

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Vliv teplotního režimu svařování na tvrdost svarových
spojů vybraných Cr-Mo ocelí**

**Influence of Welding Temperature Mode on the Weld
Hardness Selected Cr-Mo Steels**

Student:

Marek Příbyl

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Přibyl**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie

Téma: Vliv teplotního režimu svařování na tvrdost svarových spojů vybraných
Cr-Mo ocelí
Influence of Welding Temperature Mode on the Weld Hardness
Selected Cr-Mo Steels

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte vlastnosti a svařitelnost vybraných Cr-Mo ocelí.
2. Prostudujte základní techniky měření tvrdosti svarových spojů u ocelí.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření tvrdosti svarových spojů v závislosti na teplotním režimu svařování.
4. Dosažené výsledky porovnejte s lit. prameny a proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

HRIVŇÁK, I. *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.
ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

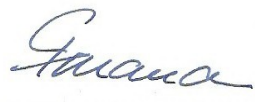
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 17. 5. 2012

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 17. 5. 2012



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Marek Přibyl

Adresa trvalého pobytu autora práce: Na Vějíři 10, Svitavy

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PŘIBYL, M. *Vliv teplotního režimu svařování na tvrdost svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 55 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Cílem práce je posouzení vlivu použitého teplotního režimu svařování na výslednou tvrdost svarového spoje z Cr-Mo ocelí. V teoretické části práce je věnována pozornost použití a vlastnostem Cr-Mo ocelí, zejména oceli 15 128 (14MoV6-3) a oceli P91. Popsány jsou také heterogenní spoje těchto ocelí a jejich problematika. Jsou prostudovány destruktivní i nedestruktivní zkoušky tvrdosti svarových spojů a výpočtové metody pro predikci tvrdosti v teplem ovlivněné oblasti spoje. V experimentální části práce je navrhnout a proveden experimentální program ověření tvrdosti svarových spojů v závislosti na použitém teplotním režimu svařování. Dále je ověřena funkčnost a přesnost vybraných výpočtových modelů pro predikci tvrdosti svarových spojů. Závěr práce je věnován diskusi dosažených výsledků a jejich srovnání s údaji v literárních pramenech.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PŘIBYL, M. *Influence of Welding Temperature Mode on the Weld Hardness Selected Cr-Mo Steels : Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2012, 55 p. Thesis head: Ochodek, V.

The aim of the thesis is an assessment of influence of used temperature mode of welding on the final hardness of weld joint from Cr-Mo steels. The theoretical part of the thesis deals with the usage and the qualities of Cr-Mo steels, especially steel 15128 (14MoV6-3) and steel P91. There are also described heterogeneous joints of these steels and their issues. The destructive and non-destructive tests of hardness of weld joints and methods of computation for a prediction of joint's hardness in an area influenced by heat have been studied. In the experimental part of the thesis there is proposed and performed an experimental programme of certification of hardness of the weld joints in dependence on used welding temperature mode. Next there is certified function and accuracy of selected computation models for the prediction of the hardness of the weld joints. The conclusion of the thesis is dedicated to the discussion about the reached results and their comparison with facts in the literature.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod.....	10
1 Přehled a vlastnosti Cr-Mo ocelí	12
1.2 Vybrané druhy Cr-Mo	15
1.2.1 P92.....	15
1.2.2 E911.....	16
1.2.3 T23.....	16
1.2.4 T24.....	16
1.2.5 P122.....	17
1.3 Ocel P91	17
1.4 Ocel 15 128 (14MoV6-3)	20
1.5 Heterogenní spojení 15 128/P91	21
2 Zkoušky tvrdosti svarového spoje	23
2.1 Destruktivní zkoušky svarového spoje	23
2.1.1 Řady vtisků	24
2.1.2 Jednotlivé vtisky	24
2.2 Nedestruktivní zkoušky svarového spoje	25
2.2.1 Metoda Optická TIV	26
2.2.2 Metoda Dynamická odrazová	27
2.2.3 Metoda Ultrazvuková (UCI).....	28
2.3 Výpočtové metody pro predikci tvrdosti	29
2.3.1 Predikce tvrdosti pro jednorůchodové svary	30
2.3.2 Predikce tvrdosti pro víceprůchodové svary	35
3 Experimentální část	38
3.1 Základní materiály a metoda svařování.....	38
3.1.1 Použité základní materiály	38
3.1.2 Použitá metoda svařování.....	38

3.2 Příprava vzorků a postup měření.....	39
3.3 Charakteristické údaje vzorků a výsledky tvrdostí.....	43
3.3.1 Materiály a svařovací parametry	43
3.3.2 TP a TZ použité u vzorků	44
3.3.3 Výsledky naměřených a predikovaných tvrdostí	44
3.3.4 Diskuse výsledků měření.....	46
3.3.5 Diskuse výsledků predikce tvrdostí.....	47
Závěr	49
Seznam použitých pramenů.....	51
Seznam obrázků	53
Seznam tabulek	54
Seznam příloh.....	55

Seznam použitých značek a symbolů

Značení	Význam	Jednotka
A_5	Tažnost	[%]
CEI	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CEII	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CEIII	Uhlíkový ekvivalent	[%]
C_{eq}	Uhlíkový ekvivalent	[%]
d	Průměr kuličky	[mm]
E_{kin}	Kinetická energie	[J]
E_{pot}	Potenciální energie	[J]
HB	Tvrdost dle Brinella	[-]
HJP	Hollomon-Jaffe Parametr	[-]
HL	Tvrdost dle Leebea	[-]
HRB	Tvrdost dle Rockwella - vtlačování kuličky	[-]
HRC	Tvrdost dle Rockwella - vtlačování kužele	[-]
HV	Tvrdost dle Vickerse	[-]
HV10	Tvrdost dle Vickerse při stanoveném zatížení 98N	[-]
HV5	Tvrdost dle Vickerse při stanoveném zatížení 48N	[-]
HV_m	Tvrdost dle Vickerse při vzniku martenzitu	[-]
HV_{weld}	Tvrdost dle Vickerse po svaření jedním průchodem	[-]
KV	Nárazová práce	[J]
M	Příspěvek tvrdosti od martenzitické struktury	[HV]
NDT	Non Destructive Testing (nedestruktivní zkoušky)	[-]
R_a	Největší hodnota střední aritmetické výšky nerovnosti	[μm]
R_e	Mez kluzu v tahu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
SK	Svarový kov	[-]
t	Čas	[s]
T	Teplota	[K]
$t_{8/5}$	Čas ochlazení z 800 na 500°C	[s]
t_b	Čas vzniku bainitu	[s]
t_{eff}	Efektivní čas	[s]
t_m	Čas vzniku martenzitu	[s]
TOO	Teplem ovlivněná oblast	[-]
TP	Teplota přehřevu	[-]

TZ	Tepelné zpracování	[-]
x	Čas ochlazování	[s]
ZM	Základní materiál	[-]
ΔHV	Rozdíl ve tvrdosti dle Vickerse mezi jedním a více průchody svaru	[-]

Úvod

Svařování je již z minulosti velmi často využívanou technologií pro vytváření nerozebíratelných spojů, při výrobě konstrukcí a součástí s naprosto různorodým využitím. Ať už se jedná o konstrukce a součásti v automobilovém, strojírenském, energetickém průmyslu nebo ve stavebnictví. Například právě energetický průmysl klade čím dál větší nároky na současné technologie. Dnešním trendem je tedy vytváření a používání technologií nových, protože stávající již prostě nevyhovují zvyšujícím se potřebám.

Nové technologie ovšem vyžadují použití kvalitnějších materiálů, které v minulosti pro jejich vyšší cenu nenašly takové uplatnění. Mezi tyto materiály se, mimo jiné, řadí i Cr-Mo oceli. Tyto materiály byly v minulosti, právě pro jejich vyšší cenu a mnohdy horší dostupnost, používány málo. Často pouze v případech, kdy bylo jejich použití nevyhnutelně nutné. Vývoj v posledních letech ovšem umožnil snížení jejich ceny, tím zvýšení produkce a rozšíření oblasti jejich použití. Vývoj se samozřejmě dotkl nejen používaných materiálů ale i svařování samotného. To však vyžaduje svarové spoje vytvořené z Cr-Mo ocelí také otestovat a zjistit jaké vlivy a do jaké míry mohou daný svarový spoj při svařování ovlivnit.

Existuje celá řada parametrů, kterými lze zjistit a popsat vlastnosti svarového spoje a jeho případné chování v provozu. Jedním z těchto parametrů je například tvrdost. Nejedná se sice o parametr, jehož určením by bylo zcela známo chování svarového spoje, ale dokáže nám ho jednoduše, rychle a celkem přesně přiblížit. Nezáleží však pouze na tvrdosti svaru jako takového, ale také na tvrdosti teplem ovlivněné oblasti (TOO). Příliš vysoká tvrdost v TOO může v provozu způsobit vznik trhlin a následně úplné zničení součásti. To by mohlo mít za následek nejen finanční ztrátu díky zastavení výroby a nutným opravám, ale i ohrožení zdraví pracovníků.

Jedním z hlavních parametrů, který ovlivňuje jak tvrdost v TOO, tak svarového spoje celkově, je použitý teplotní režim svařování. Jedná se zejména o použitou teplotu předehřevu, počet použitých svarových housenek a parametry tepelného zpracování. Špatně zvoleným teplotním režimem můžeme výslednou tvrdost svarového spoje velmi negativně ovlivnit. Pokud však teplotní režim dokážeme správně předepsat a dodržet, může výrazně ovlivnit výslednou tvrdost a tím i vlastnosti a chování svarového spoje v provozu v náš prospěch.

Cílem této bakalářské práce je tedy určit, jak a do jaké míry ovlivní použitý teplotní režim svařování výslednou tvrdost TOO svarových spojů Cr-Mo ocelí. Těchto ocelí je však celá řada a věnováním se každé z nich by bylo časově náročné. Z toho důvodu byli ke zkoumání vybráni pouze dva zástupci Cr-Mo ocelí. Jedním z nich je ocel 15 128 (14MoV6-3), která je v našich oblastech v energetickém průmyslu již celkem dlouho známá a

používaná. Druhou ocelí, které bude v práci věnována pozornost, je ocel s označením P91. Jedná se oproti 15 128 o modernější ocel, která v ČR není tak rozšířená jako 15 128. V obou případech se jedná o nízkoaloyované oceli s obsahem Cr do 1,3% v případě 15 128 a přibližně 9% v případě P91. Tyto oceli byly zvoleny záměrně pro lepší porovnání klasické a moderní Cr-Mo oceli a také z důvodu, že ocel 15 128 je ocelí P91 v současné době často nahrazována.

V práci bude kromě popisu Cr-Mo ocelí a zkoušek tvrdosti svarových spojů věnována pozornost také výpočtovým modelům pro predikci maximální tvrdosti TOO. Bude zkoumána jejich funkčnost a případná přesnost při aplikaci na vybrané Cr-Mo oceli. Tyto modely mohou při správném používání ušetřit značné náklady a čas na zkoušení svarových spojů.

Cr-Mo oceli jsou v současné době, zejména v energetickém průmyslu, velice žádané. Výsledky dosažené v této práci by proto mohly být prospěšné při volbě teplotního režimu použitém při jejich svařování, čímž se zajistí jejich požadované vlastnosti a stálost v provozu.

1 Přehled a vlastnosti Cr-Mo ocelí

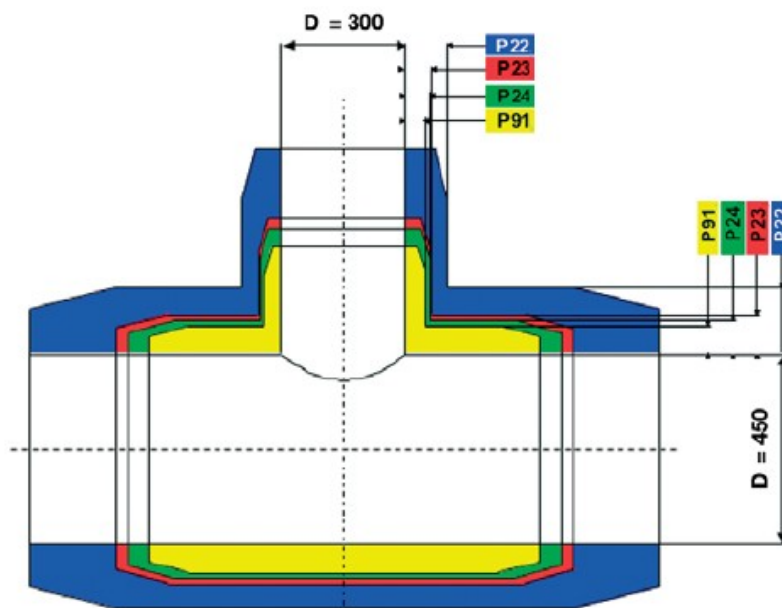
První zmínka o Cr-Mo ocelích byla již před 2. světovou válkou. V Anglii, ještě před rokem 1940 byla pro elektrárenské parovody a přehřívací trubky vyvinuta vanadem legovaná ocel typu 0.5% Cr-0.5% Mo-0.3%V. Cr-Mo oceli jsou tedy již dlouho a s velkým úspěchem využívány v energetickém a petrochemickém průmyslu. To zejména pro jejich vysokou odolnost proti tečení i za vysokých teplot. V těchto odvětvích průmyslu je nepřetržitá snaha o optimalizaci ekonomických nákladů v různých provozních zařízeních. To vede k neustálému zvyšování teplot a tlaků na součásti, těmito odvětvími využívanými. Takovými součástmi mohou být např.: různé druhy kotlů, ohřivače, tepelné výměníky, parovody nebo třeba reaktory. Všechny tyto nebo i některé jiné součásti energetických, popř. chemických zařízení jsou zpravidla známé jako silnostěnné nádoby. Zmíněné neustálé zvyšování tlaků a teplot na ně však klade čím dál větší nároky. Z toho vyplývá, že by součásti, pro splnění na ně kladených požadavků, musely být stále s většími tloušťkami stěn, případně vyvíjeny zcela nové či upravené materiály. Jejich zvýšené mechanické vlastnosti výrazně snižují nebo alespoň omezují potřebné tloušťky stěn, což přináší další ekonomické výhody ve výrobě. Není například nutné manipulovat a zpracovávat tak těžké součásti, které navíc v následném provozu šetří místo. Příklad klasické silnostěnné nádoby je třeba hydrokrakovací jednotka z italské společnosti ATB (Obr. 1). Její délka je 21m, průměr více jak 5m a pracuje pod tlakem 215,5 baru při teplotě až 454°C. [1, 20]



Obr. 1 Hydrokrakovací jednotka ATB [1]

Základní a klasické Cr-Mo oceli jsou slitiny obsahující 0,5% Mo a 1% Cr; 0,5% Mo a 2,25% Cr; 1% Mo a 5% Cr; 1% Mo a 9% Cr; 1% Mo a 12% Cr. Z těchto ocelí se přidáním prvků V, W, Ni, Ti, Nb, B a/nebo N dospělo k novému stupni, který známe dnes – z českých např. 15 128 nebo zahraniční T/P22, T/P23, T/P24, T/P91, T/P92 a VM12. Mnohé z těchto

ocelí byly a jsou s úspěchem používány v průmyslu po celém světě. Na obrázku 2 je vidět možnost použití menších tloušťek stěn se zvyšujícími se mechanickými vlastnostmi použitých materiálů. Vývoj nových materiálů, však musí pokračovat i nadále. S tím je spojen i vývoj nových přídatných materiálů, které musí, stejně jako základní materiál, plnit velice přísné požadavky na součásti. Jedním z podniků, zabývajících se výzkumem a vývojem přídatných materiálů pro Cr-Mo oceli je např. německá firma Böhler Schweisstechnik. Se zvyšující se úrovní vyráběných slitin je vyžadována přísnější kontrola parametrů svařování a tepelného zpracování. [1, 2]



Obr. 2 Snížení potřebné tloušťky stěny při použití kvalitnějších materiálů [2]

Hlavní výhodou tečení (creepu) odolných ocelí je schopnost odolávat určitému provoznímu zatížení za současného působení stanovené teploty, aniž by došlo k jejich prodloužení. Maximální napětí, při kterém dojde k porušení součásti za určité teploty např. 620°C za 100hod., se nazývá mez pevnosti v tečení. Základní myšlenkou tedy je, že součást i po dobu 20ti nebo 30ti let v provozu nezmění svůj tvar ani velikost. Vzhledem k tomu, že při procesech v rámci výroby energie a petrochemickém průmyslu působí různé provozní podmínky jako je např. tlak, teplota, okolní prostředí apod., máme na výběr ze širokého spektra tečení odolných materiálů s přídatky V, W Ti, Nb, B a/nebo N, mezitím co se vyvíjí stále nové druhy ocelí. [1]

Odolnost Cr-Mo ocelí proti tečení spočívá ve vytvoření stabilních precipitátů (např. slitiny karbidů) ve feritické, bainitické a/nebo martenzitické struktuře při normalizačním žhání. Potom je aplikováno popouštění, které zajistí stabilní mikrostrukturu s již vytvořenými precipitáty, které pak zůstanou stabilní i při provozní teplotě, pro kterou byla

ocel vytvořena. Precipitáty blokují hranice zrn a tím brání posunu kluzových rovin, aby ocel poskytovala požadované vlastnosti a odolnost proti tečení. Musí mít správný tvar, množství a rovnoměrné rozmístění s homogenní strukturou, tedy i s homogenními vlastnostmi. Konkrétní typy precipitátů se budou tvořit v závislosti na druhu oceli a použitém tepelném zpracování (upravujícími parametry při TZ je teplota a čas). [1]

Tepelné zpracování je pro Cr-Mo oceli poměrně složitý proces, který je však nutný pro získání požadovaných mechanických vlastností. V závislosti na druhu slitiny a tloušťce výrobku jsou podmínky tepelného zpracování (jako je rychlost ohřevu/chladnutí, doba výdrže, výdrž na teplotě, atd.) řízené velmi přísnými postupy. Jedním z hlavních faktorů při tepelném zpracování je pomalá rychlost ohřevu i chladnutí, aby se předešlo napětí v materiálu. Pro součásti větších rozměrů je nutný ohřev z více stran, aby došlo k dokonalému prohřátí. S rostoucím obsahem prvků ve slitině se TZ stává náročnějším. [1]

Když však teplota materiálu při tepelném zpracování nebo i následně v provozu příliš mnoho a na příliš dlouho překročí max. teplotu, pro kterou byl materiál navržen, mohou se vytvořené precipitáty opět rozpustit a tím způsobit výrazné snížení mechanických vlastností materiálu. Pro každý materiál tedy musí být uvedena maximální teplota, které může být po určitý čas vystaven. Stejně tak i při stanovení TZ se musí brát v úvahu materiál a jeho tloušťka. V případě, že je základní materiál nebo svarový kov vystaven teplotě od 400°C do 500°C po dlouhou dobu, hrozí riziko křehnutí materiálu, které je způsobeno stopovými prvky (P, Sb, Sn a V), které se přesunují k hranicím zrn a snižují tvárnost jak základního tak svarového materiálu. Pro snížení rizika křehnutí musí být stopové prvky omezeny. [1]

S rostoucím obsahem Cr se u slitin zvyšuje odolnost proti vysokoteplotní oxidaci a také sulfidační korozní odolnost. Síra se kombinuje s chromem na sulfidy chromu, které však snižují množství karbidu chromu potřebného pro odolnost proti tečení. Ropa a většina dalších plynných paliv obsahuje určité množství síry, pro petrochemická zařízení tedy stačí odolnost proti sulfidační korozi. [1]

Cr-Mo oceli mají při dodržení správných postupů velmi dobrou svařitelnost. Svařování těchto ocelí je nutno provádět odpovídajícími přídavnými materiály, aby byla zachována homogenita svaru, mechanické vlastnosti, složení a tepelné roztažnosti, což snižuje riziko tepelné únavy v materiálu při provozu, především v teplem ovlivnění oblasti. Provádět svařování je možné všemi metodami obloukového svařování. V případě manuálních procesů je třeba brát ohled na ochranu svářeče před teplem. Je nanejvýš důležité, aby byla respektována teplota předehřevu i teplota interpass. Nesmí být omezována kvůli pohodlí svářeče. Materiál totiž velice prudce reaguje na zdroje tepla. Pro maximální ochranu je potřeba svar chránit ochranným plynem před okolním prostředím. Vzhledem k vysokým teplotám předehřevu musíme dbát na celistvost plynové ochrany, proto existují celé řady

trysek. Přídavné materiály se musí neustále přizpůsobovat tendenci zvyšování tloušťek materiálů, zvyšujícími se nároky na mechanické vlastnosti a chemické složení, aby byly svarové spoje proveditelné. Na obrázku 3 je vidět svarový spoj na parovodu vyrobeném ze silnostěnné trubky (materiál P91). S rostoucí počáteční pevností jsou kladeny větší nároky na použitou technologii, svařovací parametry a dovednost svářeče. Nedodržení stanovených parametrů může vést k vyvstání následných problémů. Proto je nutné použít řádné kontrolní mechanismy pro dodržení požadovaných vlastností svarového spoje. Zajištění kvality se tedy stává důležitým faktorem a je nutné jej zařadit při výrobě a zpracování Cr-Mo ocelí. [1]



Obr. 3 Svarový spoj na silnostěnném parovodu z P91 [2]

1.2 Vybrané druhy Cr-Mo

Vybrané druhy Cr-Mo ocelí a jejich stručný popis jsou níže (ocelím 15 128 a P91 jsou pro jejich úlohu v této práci věnovány následující zvláštní kapitoly):

1.2.1 P92

Hlavní výhodou této slitiny v porovnání s P91 je pevnost v tečení, je však mnohem dražší. Vzhledem k poptávce po vyšší účinnosti je třeba zvyšování teploty a tím i zvyšování využití této slitiny v blízké budoucnosti. V současnosti je P91 z hlediska nákladů velmi efektivní pro systémy tepelných výměníků parních generátorů využívajících spalovací turbíny. P92 byl vybrán pro elektrárnu Avedore v Dánsku, protože požadavky na teplotu a tlak by na výstupu kotle a hlavním parovodu vyžadovalo P91 s tloušťkou stěny více jak 100mm, což je více než současné výrobní kapacity. V současnosti se v USA aktivně uvažuje o použití P92 pro velké instalace, protože dokáže snížit tloušťku stěny o 30% oproti P91 za stejné teploty a povoleného napětí. [15]

1.2.2 E911 (podobně jako P91 ale s 1% W)

Tento materiál vznikl, aby se stal alternativním konkurentem P92. Nicméně, i když je lepší než P91, tak nedosahuje takových creepových vlastností jako P92 a vykazuje po srovnávacích testech 108MPa za 105 hodin při teplotě 600°C. Slitina má certifikaci TÜV, ale ještě není schválena ASME. Její použití bude pravděpodobně omezeno jen na evropská zařízení. [15]

1.2.3 T23 (podobná P22, ale silnější s 2%W)

Vyšší teploty a tlaky páry vyžadují, aby i parní kotle snesly tyto změny. Při vyšších teplotách konstrukce však materiálové charakteristiky současných ocelí nesplňovaly zvýšené požadavky s ohledem na odolnost proti tečení a dlouhodobých vlastností. Z tohoto důvodu byly pro stěny trubek vyvinuté a kvalifikované materiály T23 a sesterská T24. Tato slitina byla původně vyvinuta v Japonsku a byla známá jako HCM2S. Obsahuje pouze 2%Cr, z čehož vyplývá, že i když má velkou vrubovou houževnatost, oxidace omezuje teploty, při kterých může být použita. Stejně jako u P92 existuje velký rozsah mezi patentem a ASTM schválených limitů složení pro další výrobu slitiny. Vzhledem ke své dobré creepové pevnosti 80MPa (105 hod. při 600°C) je slitina aktivně podporována evropskými výrobci jako nákladově výhodnější vylepšení z T22 a v některých případech jako alternativa k P91. Tato slitina byla původně navržena tak, aby nevyžadovala tepelné zpracování, ačkoli je mnohdy vyžadováno obzvláště v tlustých součástech. [15, 2]

1.2.4 T24 (podobná jako T22 ale s V+Ti+B)

Tato slitina byla původně vyvinuta jako sesterský produkt k T23. Podobně jako E911 má slitina certifikaci TÜV, ale nemá certifikace ASME/ASTM. Použití slitiny v blízké budoucnosti bude pravděpodobně omezeno pouze na Evropu. Dosahuje poněkud vyšší pevnosti v tečení za nižších teplot než T23, a tak může být cenově výhodnější než T23, jako vylepšení z T22. Část rozdílu v nákladech vznikla použitím Mo místo W jako posilovací složky. Výhodou těchto dvou ocelí v souvislosti se zpracováním je relativně nízké zpevnění v teplem ovlivněné oblasti po svařování (Tvrdost max. 350HV). Ekvivalentní přídavné svařovací kovy jsou pro tyto materiály také nezbytné. Je na ně kladen požadavek vysoké tuhosti svarového spoje. Přídavné materiály složením odpovídající T24 již byly úspěšně použity ve fluidních kotlech tepelných elektráren. V současné době jsou T/P23 a T/P24 způsobilé pro další rozvoj energetice. Zejména jsou stanoveny dlouhodobé vlastnosti svarů a svarových spojů. [15, 2]

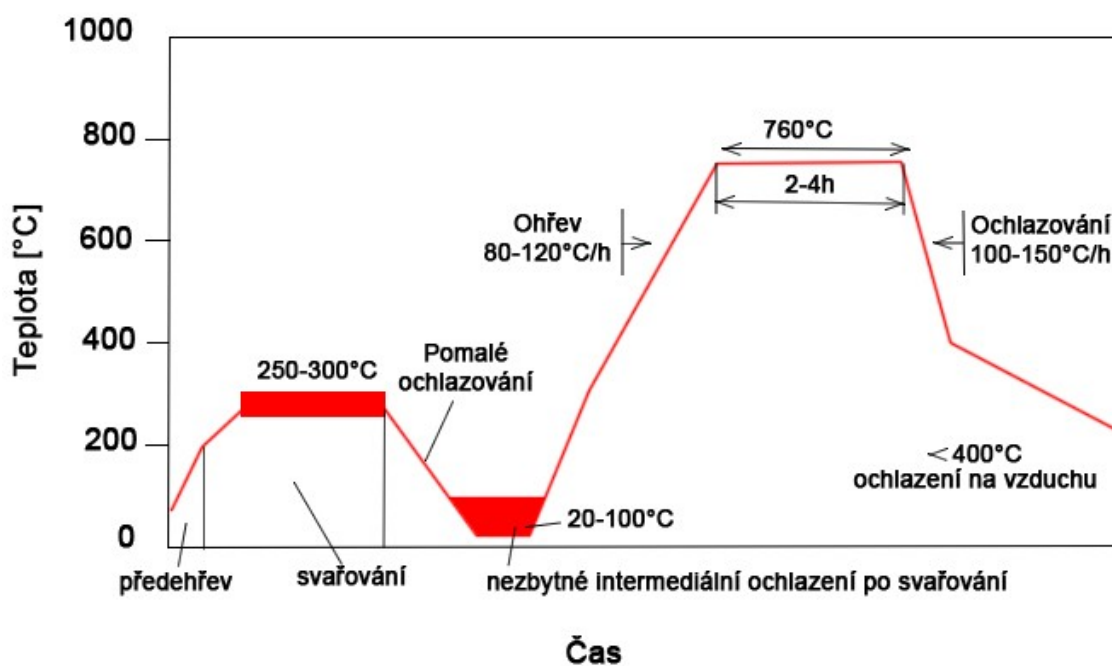
1.2.5 P122 (jako P92 ale s 11% Cr a 1%Cu)

V Japonsku slitina známá jako HCM12A má schválení ASME. Zvýšený obsah Cr (10-12%) způsobuje užitečné zlepšení při odolávání korozi ve vyšších teplotách oproti ocelím s obsahem 2-9% Cr. Při překročení obsahu chromu 11% klesá lomová pevnost. Současný patent je velmi komplexní a omezuje praktické schopnosti pro ostatní nabízené slitiny. Nicméně přípustné namáhání a rozsah obsahu Cr byly sníženy. V Evropě je snaha vytvořit efektivní alternativu k P122. Cíle pro alternativu obsahují mez teční při teplotě nad 600°C vyšší nebo rovna než P92. Zvýšení obsahu chromu odpovídající starší ale slabší X20 (12CrMoVW) a nabízející dobrou svařitelnost podobně jako u P91 (omezení obsahu uhlíku do 0,15%) [15]

1.3 Ocel P91

Tato ocel byla vyvinuta za účelem dobré výdrže při zvýšených provozních zatíženích (teplota a tlak), kterou přinášela potřeba stále větších výkonů. Používá se s úspěchem už více jak 20let v elektrárnách po celém světě. K nám se však dostala poměrně nedávno. Jejím předchůdcem byla ocel s označením T/P22, oproti kterému má P91 mnohem vyšší pevnost až do 600°C a také teploty, při kterých dochází k oxidaci, jsou vyšší. To v té době umožnilo snížit tloušťky konstrukcí při zachování stejných parametrů a téměř desetinásobné prodloužení životnosti. To vše přispělo ke zlepšení ekonomiky. P91 se od svého předchůdce, oceli P22, liší především obsahem Cr (9% proti 2,5%), obsahem Mo (1%) a přidáním malého množství niklu a manganu. Právě chrom umožnil zvýšení pevnosti a odolnosti proti oxidaci, Mo zvýšil odolnost oceli proti tečení a nikl s manganem přispěli k lepší prokalitelnosti oceli. Precipitační zpevnění je u této oceli způsobeno především částicemi typu $M_{23}C_6$. [15]

Tato ocel má však jistou nevýhodu v její náchylnosti na přesnost tepelného zpracování. Oproti jejímu předchůdci je totiž mnohem více náchylná na změny v mikrostruktuře, proto nedodržení přísných požadavků tepelného zpracování může vést ke snížení jejich mechanických vlastností až pod úroveň P22. Předehřev, udržování teploty interpass a tepelné zpracování je proto velice důležité. Na obrázku 4 je zobrazena doporučená teplota při svařování a následném tepelném zpracování, která by neměla výrazněji překročit 760°C. Při jejím překročení hrozí rozpuštění precipitátů, které vytvářejí odolnost proti tečení. Ocel lze svařovat všemi známými metodami svařování, včetně ručních. Vzhledem k delší době od jejího prvního použití již bylo vytvořeno mnoho studií zabývajících se jejími vlastnostmi po dlouhé době, stejně jako byli vytvořeni i její nástupci. [15, 16]



Obr. 4 Teplotní režim svařování pro ocel P91 [2]

Mechanické vlastnosti [3]:

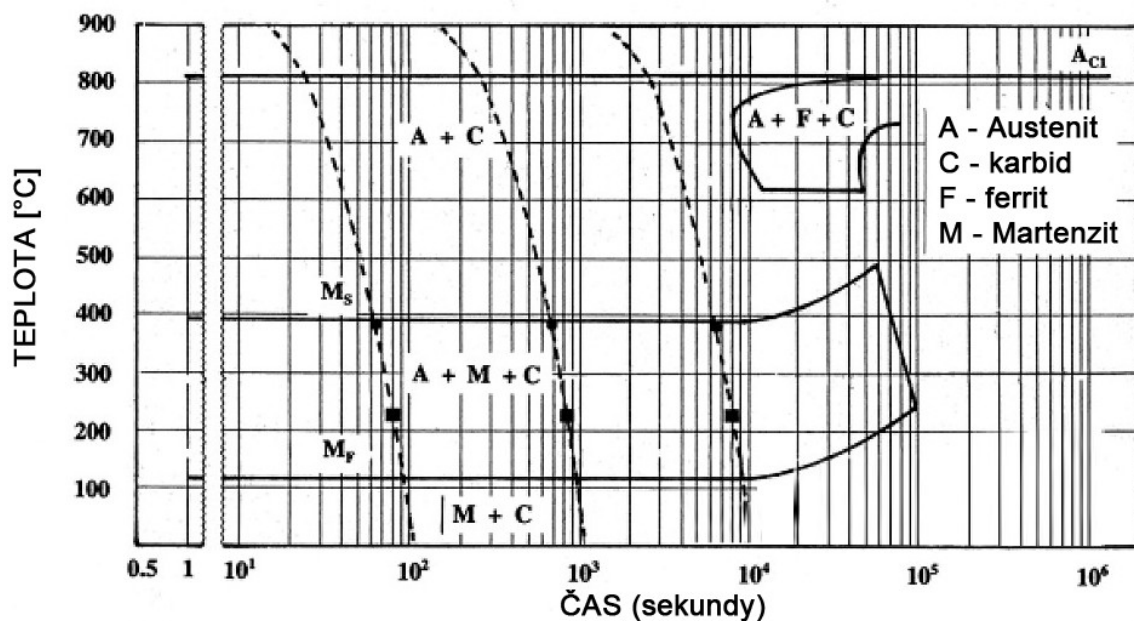
- $R_m = 630 - 830 \text{ MPa}$
- $R_e \geq 450 \text{ MPa}$
- A_5 (napříč) $\geq 17\%$
- A_5 (podél) $\geq 19\%$
- KV (napříč) $\geq 27 \text{ J}$
- KV (podél) $\geq 40 \text{ J}$

Tabulka č. 1 ukazuje chemické složení oceli P91:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Cr [%]
0,08-0,12	0,20-0,50	0,30-0,60	<0,020	<0,010	<0,040	8,00-9,50
Cu [%]	Mo [%]	N [%]	Nb [%]	Ni [%]	V [%]	
-	0,85-1,05	0,03-0,07	0,06-0,10	<0,40	0,18-0,25	-

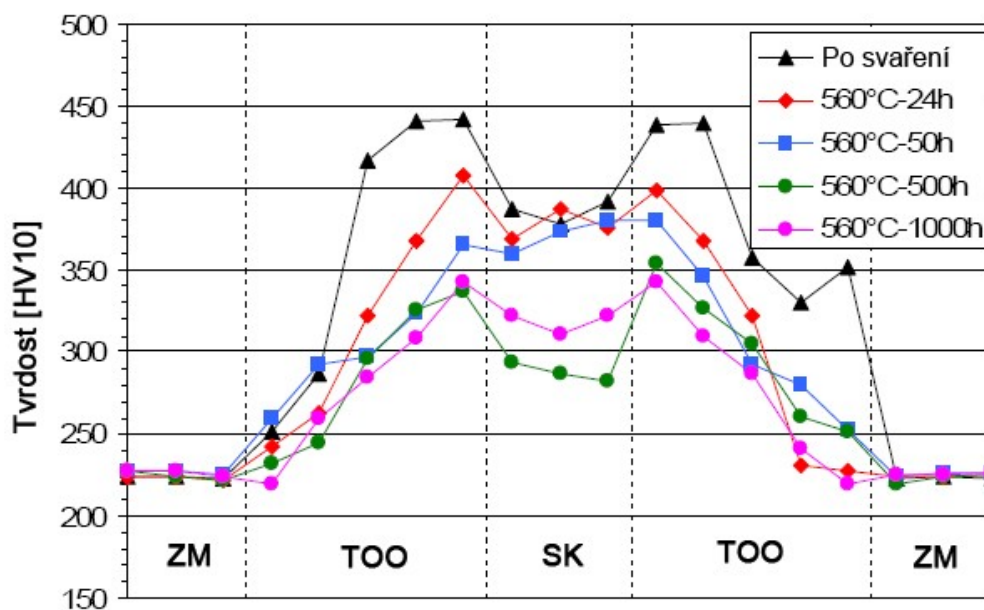
Tab. 1 Chemické složení oceli P91 [15]

Na obrázku 5 je zobrazen ARA diagram pro ocel P91:



Obr. 5 ARA diagram pro P91 [27]

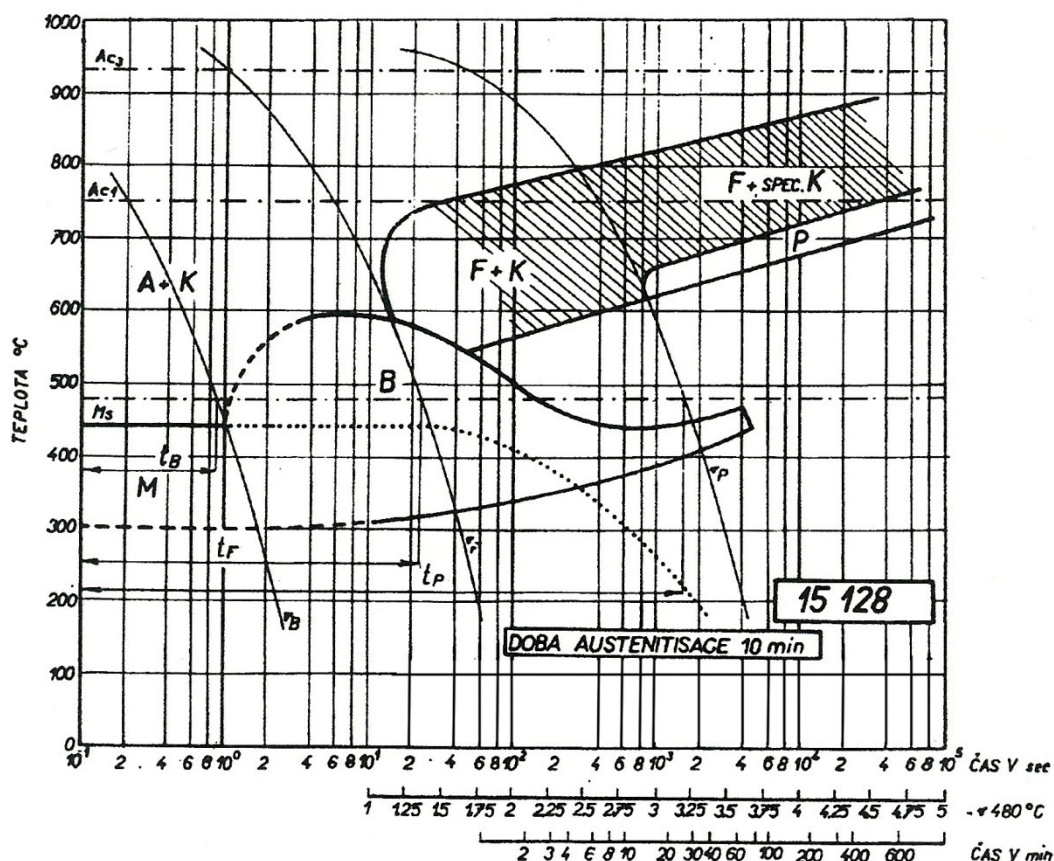
Obrázek 6 ukazuje tvrdost v jednotlivých oblastech svarového spoje po dlouhodobém vystavení svarového spoje provozním podmínkám. Jak je vidět, tak základní materiál si zachovává stále stejné vlastnosti na rozdíl od teplem ovlivněné oblasti a svarového kovu, kde je tvrdost (zvláště v teplem ovlivněné oblasti) zvýšena.



Obr. 6 Tvrdost jednotlivých oblastí svarového spoje z P91 [17]

1.4 Ocel 15 128 (14MoV6-3)

Jedná se, o poměrně dlouho známou žárovečnou CrMoV slitinu, která dle dostupných zdrojů byla využita již v roce 1968 pro elektrárenské parovody v Bosně a Hercegovině. I přesto, že je v posledních letech stále více nahrazována kvalitnějšími a modernějšími slitinami, stále se můžeme s touto slitinou v mnohých zařízeních setkat. Je využívána zvláště v energetickém a chemickém průmyslu, díky její žárovečnosti a schopnosti odolávat korozi až do provozní teploty okolo 540°C. Její nahrazování novými materiály je způsobeno především jejím dlouhým provozem za vysokých pracovních teplot, tím dochází ke změnám mikrostruktury, tvořené směsí bainitu a ferritu, někdy s malým množstvím perlitu (viz. ARA diagram na obrázku 7), a ke snížení jejích mechanických vlastností. Precipitační zpevnění je u 15 128 způsobeno hlavně nanočásticemi V_4C_3 nebo VCN. Oproti P91 obsahuje výrazně nižší množství Cr (do 1%) a jiných legujících prvků (viz. tabulka 2). V zahraničí je známa jako 14MoV6-3 (DIN) nebo TS33/P33/F33 (ISO).[18]



Obr. 7 ARA diagram pro 15 128 [27]

Pro tuto ocel je doporučován předehřev o teplotě 200 – 250°C pro tloušťky stěn do 40mm a pro větší tloušťky 250-350°C. Po svaření je doporučené relaxační žihání v teplotním rozsahu od 620°C do 710°C a následné popouštění při teplotě 650 a 750°C.[7]

Mechanické vlastnosti [3] :

- $R_m = 460 - 610 \text{ MPa}$
- $R_e \geq 320 \text{ MPa}$
- $A_5 \text{ (napříč)} \geq 18\%$
- $A_5 \text{ (podél)} \geq 20\%$
- $KV \text{ (napříč)} \geq 27 \text{ J}$
- $KV \text{ (podél)} \geq 40 \text{ J}$

Tabulka č. 2 ukazuje chemické složení oceli 15 128:

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]
0,10-0,18	0,45-0,70	0,15-0,40	0,50-0,75
Mo [%]	V [%]	P [%]	S [%]
0,40-0,60	0,22-0,35	<0,040	<0,040

Tab. 2 Chemické složení oceli 15 128 [19]

1.5 Heterogenní spojení 15 128/P91

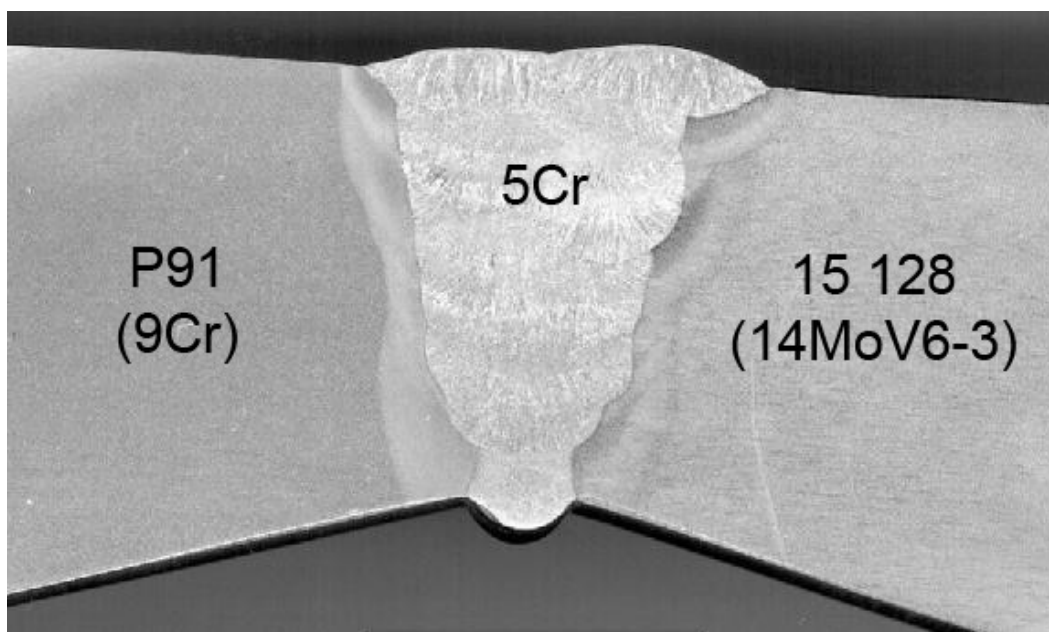
Svarový spoj je obecně nejslabším místem celé svařované konstrukce, hrozí u něj největší riziko lomu stejně tak jako rozdílné mechanické vlastnosti nebo teplotní odolnosti oproti základnímu materiálu. O to více v případě svařování rozdílných základních materiálů, v tomto případě ocel 15 128 a ocel P91. V české energetice je toto heterogenní spojení poměrně časté a to hlavně z důvodů modernizace, případně rekonstrukce zařízení. [3]

Hlavní vliv na stabilitu heterogenních spojů z 15 128 a P91 je rozdílné chemické složení obou základních materiálů. Při svaření dochází k částečnému promísení základních materiálů spolu s přídavným materiálem. Tím dochází ke vzniku rozdílného potenciálu, který je dán rozdílem obsahů jednotlivých obsažených prvků, především Cr (okolo 8%). Tím je vytvořen základ pro termodynamické fázové transformace. V provozu, při vystavení tohoto heterogenního spoje creepové expozici, dochází k difuzi intersticiálních prvků z 15 128 do P91. Přestože je rozdíl v obsahu uhlíku u obou ocelí minimální, existuje mezi ocelmi tzv. aktivační gradient, který způsobí u P91 nauhličené pásmo se sníženou vrubovou houževnatostí a u 15 128 naopak pásmo oduhličené se sníženou pevností, tím je ovlivněna strukturní stabilita a životnost heterogenních konstrukcí. Zvláště oduhličené pásmo se v podmínkách creepové expozice stává kritickým. Difuze uhlíku vzrůstá s dlouhodobým

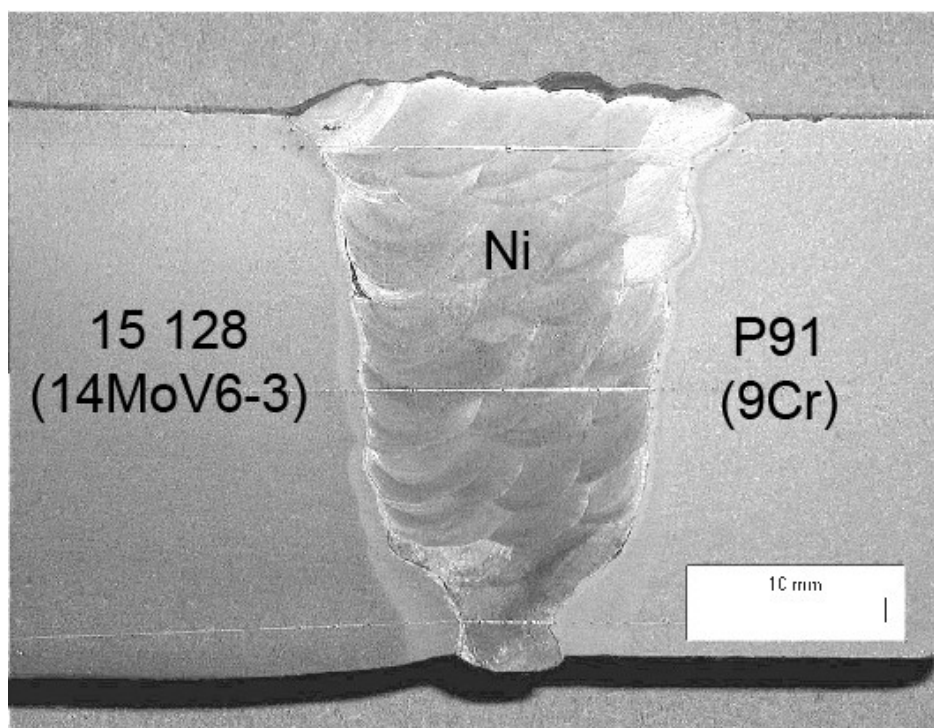
provozem zařízení za vysokých teplot. K difuzi dochází i u substitučních prvků, ne však tak výrazně jako u intersticiálních prvků. Na vznik nauhličených/oduhličených pásem má vliv zejména použitý materiál, optimalizace procesu svařování s ohledem na promísení základních a přídavného materiálu a vhodná volba tepelného zpracování po svařování. [3, 4, 5]

V tomto heterogenním spoji má navíc vliv i vodík, který snižuje pevnost a kontrakci. Dále má podstatný vliv na lomovou náchylnost spojení. Vodík, spolu s výše zmíněnými mechanismy, ovlivňuje jak mechanické nebo žárovevné vlastnosti, ale může mít negativní vliv i na korozní odolnost spoje. [6]

Volba přídavného materiálu se řídí především s ohledem na minimalizaci rozdílů v chemickém složení obou ocelí při současném zachování mechanických a žárovevných vlastností, které jsou způsobeny legujícími prvky jako je Cr, Mo a V. Při volbě přídavného materiálu musíme brát také ohled na eliminaci difuze uhlíku pro zachování strukturní integrity a stability zajišťující potřebnou životnost konstrukce. Proto připadají do úvahy přídavné materiály na bázi CrMoV (Obr. 8) nebo na bázi Ni (Obr. 9), který vytváří difuzní bariéru proti difuzi uhlíku. Současní výrobci přídavných materiálů nabízí v dnešní době velké možnosti výběru. Svařitelnost proto nebývá problémem.[4, 1]



Obr. 8 Heterogenní spojení 15 128 a P91 (přídavný materiál na bázi CrMoV) [23]



Obr. 9 Heterogenní spojení 15 128 a P91 (přídavný materiál na bázi Ni) [23]

Tepelné zpracování se u tohoto heterogenního spoje volí obdobně jako u jiných heterogenních spojů. Při svařování kovů s rozdílným chemickým složením a vlastnostmi je třeba přihlédnout na chemické složení svarového kovu. Volba tepelného zpracování se zpravidla volí podle slitiny s vyšším obsahem legujících prvků, tedy P91. Většinou se používá pouze lokální tepelné zpracování. Při tepelném zpracování nesmí být překročena kritická teplota ani jednoho materiálu, aby nedošlo k rozpuštění precipitátů a tím ke snížení mechanických vlastností. [7]

2 Zkoušky tvrdosti svarového spoje

2.1 Destruktivní zkoušky svarového spoje

Tyto zkoušky se provádějí dle normy ČSN EN ISO 9015-1. Tvrdost ve všech částech svarového spoje se měří běžně tvrdostí podle Vickerse a to při zatížení 48N (HV 5) nebo 98N (HV 10). Zkouška se provádí při teplotě okolí cca. 23°C, pokud není stanoveno jinak.

Vzorky pro provedení zkoušky se odebírají ze svaru mechanickým řezáním. Povrch zkušebních vzorů nesmí být ovlivněn použitou technologií dělení. Řezy provádíme kolmo na osu svaru a to tak, aby vzorek vždy obsahoval oba základní materiály, obě teplem ovlivněné oblasti a samotný svarový kov. Povrch zkušebních vzorků je třeba vybrousit případně použít i leptání pro zviditelnění jednotlivých oblastí svarového spoje. Dělení a

následnou přípravu vzorku je potřeba provést velice důkladně, tvrdost zkoušeného povrchu totiž nesmí být ovlivněna metalurgickými změnami. Norma umožňuje dva postupy zkoušek. [8,9]

2.1.1 Řady vtisků

Počet a umístění vtisků musí být voleno tak, aby bylo možné zjistit oblasti se sníženou, případně zvýšenou tvrdostí způsobenou svařováním. Doporučené vzdálenosti a počty vtisků jsou dané normami. Pokud to smluvní strany vyžadují tak se vzdálenosti, polohy, případně doplňkové řady vtisků mohou měnit. Musí to však být následně uvedeno v protokolu o zkoušce. Na základním kovu je potřeba provést takové množství vtisků, aby bylo zajištěno, že se zkoušky provádí na tepelně neovlivněném materiálu. Na svarovém kovu je vzdálenost vtisků nutno volit tak, aby naměřené hodnoty umožnily vyhodnocení a kontrolu spoje. V TOO uvádí doporučenou vzdálenost vtisků tabulka č. 3. [8]

Symbol tvrdosti	Doporučená vzdálenost mezi vtisky L ¹⁾	
	Kovy na bázi železa ²⁾	Hliník, měď a jejich slitiny
HV 5	0,7	2,5 až 5
HV 10	1	3 až 5
HB 1-2,5	nepoužitelné	2,5 až 5
HB 2,5/15,625	nepoužitelné	3 až 5
¹⁾ Odstup od kteréhokoliv vtisku od předchozího nesmí být menší než hodnota povolená normou ISO 6507-1 pro předchozí vtisk ²⁾ Kromě austenitických ocelí		

Tab. 3 Doporučená vzdálenost L mezi středy vtisků v tepelně ovlivněné oblasti [8]

V přílohách 4-6 je znázorněno umístění vtisků na tupých, koutových a T spojích

2.1.2 Jednotlivé vtisky

Umístění jednotlivých vtisků se volí do jednotlivých oblastí. V příloze 7 jsou znázorněny oblasti pro umístění jednotlivých vtisků. Skupina 1 – 4 náleží teplem neovlivněnému základnímu materiálu, skupina 5 – 10 náleží teplem ovlivněné oblasti a 11 – 14 svarovému kovu. Při testování je třeba jednotlivé oblasti číslovat. Umístění vtisků můžeme určit také metalograficky. Má-li se předejít vlivu deformace způsobené nejbližším vtiskem, minimální vzdálenost mezi středy jednotlivých vtisků v kterémkoli směru nesmí být menší než 2,5 násobek střední úhlopříčky nejbližšího vtisku. [8]

Naměřené hodnoty tvrdosti se zaznamenávají s údajem, ve kterém místě svarového spoje bylo této tvrdosti dosaženo. Naměřené hodnoty tvrdosti je třeba porovnat s hodnotami tvrdosti uváděnými pro svarové spoje daného materiálu v materiálových listech, ve výrobních normách nebo průběžně platných normách v oblasti svařování např. ČSN EN 288-3. O provedení zkoušky je většinou požadována zpráva o zkoušení, jejíž rozsah je uveden v normě ČSN EN ISO 9015-1. [8]

2.2 Nedestruktivní zkoušky svarového spoje

Nedestruktivní zkoušky svarových spojů, často označované jako NDT, představují významnou a rozsáhlou oblast z hlediska testování svarových spojů, výrobků a materiálů bez jejich poškození. Pomocí NDT je možné zjistit jak skryté povrchové vady nebo vnitřní vady tak i tvrdost materiálu. Jejich velkou výhodou oproti zkouškám destruktivním je možnost provádění zkoušek za provozu, bez demontování součástí a také během jakékoli fáze výroby. Výsledky NDT jsou v současnosti mnohdy podmínkou prodejnosti výrobku a mají rozhodující význam při ověření správnosti technologických postupů, upozorňují na nedostatky a pomáhají při odstraňování příčin vzniku vad.[10, 11]

Nedestruktivní zkoušky tvrdosti svarových spojů používaných v současnosti jsou:

- optická TIV (viz. kapitola 2.2.1)
- dynamická odrazová (viz. kapitola 2.2.2)
- ultrazvuková (viz. kapitola 2.2.3)

Tabulka 4 přehledně ukazuje vhodnost použití jednotlivých metod NDT pro různé aplikace [11]:

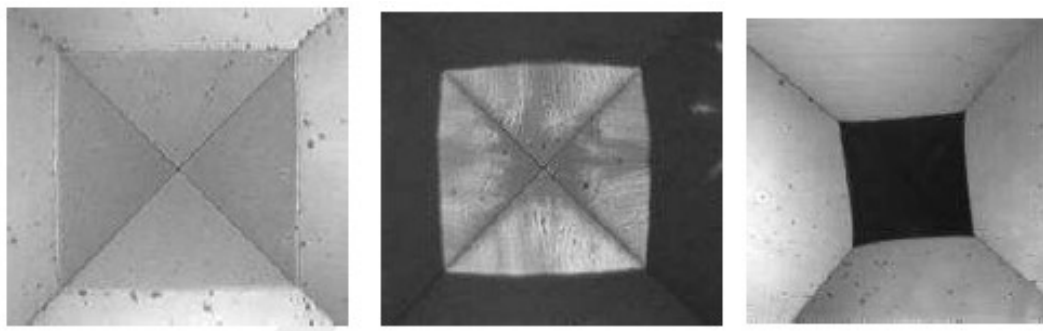
Aplikace	UCI metoda	Dynamická metoda	TIV
Pevné části	+	++	+
Hrubozrné materiály	-	++	-
Hliníkové a ocelové odlitky	0	++	0
Teplem ovlivněná oblast svaru	++	-	++
Trubky: tloušťka stěny > 20mm	++	++	++
Trubky: tloušťka stěny < 20mm	++	-	++
Nehomogenní povrch	-	+	-
Tenké vrstvy	++	-	++
Obtížný přístup k měřené pozici	++	-	+
Hrubé povrchy	-	+	-
Finálně obrobené povrchy	++	0	++

(++ zvláště vhodné / + dobře vhodné / 0 někdy vhodné / - Nedoporučeno)

Tab. 4 *Vhodnost použití jednotlivých metod NDT [11]*

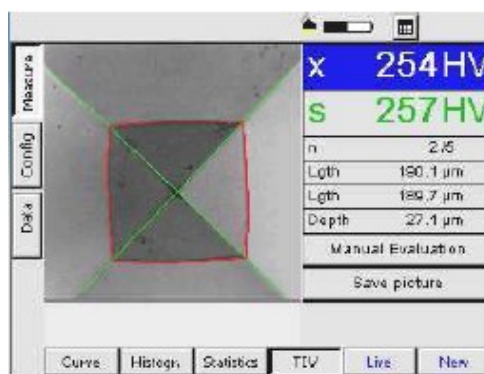
2.2.1 Metoda Optická TIV

Through Indenter Viewing – Pohled skrz diamant. Jedná se o novou metodu pro zkoušení tvrdosti. Jde v podstatě o skutečné měření tvrdosti podle Vickerse. Měření se provádí při statickém zatížení bez ovlivnění elastickými vlastnostmi materiálu, jeho hmotností a geometrickým tvarem. Jak už název napovídá tak měřicí sonda, obsahující vnikající tělísko (Vickersův diamant), obsahuje také optickou soustavu a monochromatickou CCD kameru. Průběžné zobrazení vpichu je v reálném čase zobrazováno na LCD display. Na obrázku 10 jsou záběry pořízené CCD kamerou při různých měřeních. [11, 12]



Obr. 10 *Obraz pořízený CCD kamerou při různých měřeních* [11]

Měření se provádí při ručním zatížení, které dosahuje hodnoty 10N nebo 50N. Při dosažení stanoveného zatížení, se obraz zastaví, měřicí zařízení vyhodnotí jeho kontrast, obraz orámuje, změří úhlopříčky a určí hodnotu tvrdosti (HV), kterou je samozřejmě možné převést do jiné stupnice. Na obrázku 11 je zobrazeno vyhodnocení tvrdosti měřicím přístrojem. [11, 12]



Obr. 11 *Vyhodnocení tvrdosti měřicím přístrojem* [11]

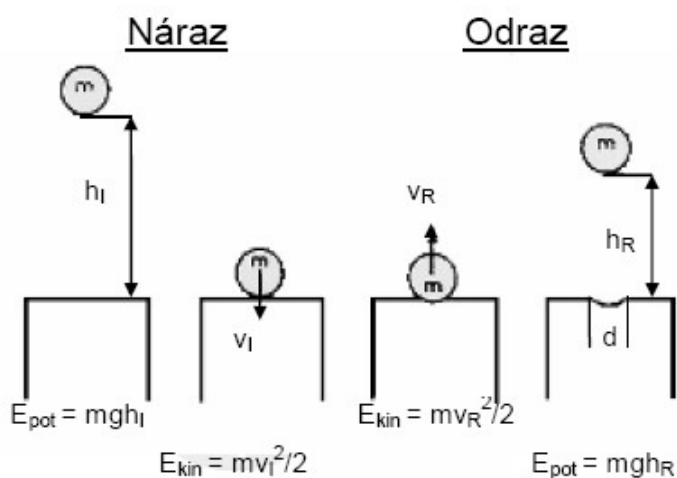
Měření probíhá obdobně jako u metody UCI, v tomto případě je však zatížení statické. Výhodou je, že se jedná o skutečné měření dle Vickerse, odpadá tedy kalibrování přístroje před měřeními rozdílných materiálů. Při provádění měření je také možno v reálném čase kontrolovat kvalitu měření (nezřetelné rohy nebo nepravidelnost vpichu). Tato metoda je zvláště vhodná pro zkoušení tenkých materiálů, jako jsou například tenkostěnné trubky, nebo součástí s nepravidelným povrchem (díky statickému zatížení sondy). V případě

měření plechů, jejichž tloušťka je menší než 1,5mm, je zkoušený vzorek nutno podložit pevnějším materiálem a tvrdoměr umístit do stojánu. [11, 12]

2.2.2 Metoda Dynamická odrazová

Tato metoda, je na rozdíl od metody ultrazvukové mnohem méně náročná na kvalitu měřeného povrchu. Potřebná je drsnost Ra 6,3 a nižší. Je vhodná pro měření tvrdosti hrubozrnných materiálů, výrobků z oceli a litých materiálů. Zkoušené součásti musí mít větší velikost, pro menší předměty je zkouška, z důvodu možnosti jejich poškození nebo zničení, nevhodná. Minimální tloušťka zkoušeného dílu je 10-15mm (měřeno ve všech směrech) a hmotnost 5kg. [11, 13]

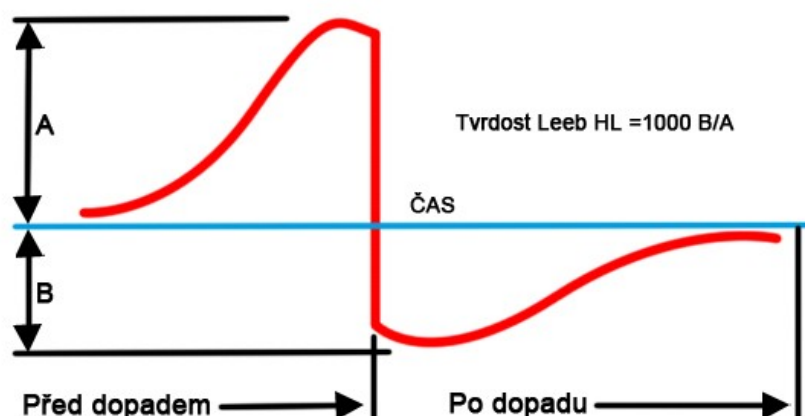
Principem této zkoušky je měření rozdílu kinetické energie kuličky (vyrobené ze slinutých karbidů, nejčastěji karbidu wolframu, případně z diamantu pro zkoušení velmi tvrdých materiálů) proti povrchu materiálu vystřelené a kinetické energie kuličky od materiálu odražené. Kulička je vystřelena na povrch zkoušené součásti přesně danou rychlostí, čímž získá kinetickou energii. Při nárazu vznikne plastická deformace materiálu, díky čemuž kulička ztratí část získané kinetické energie. Čím menší je deformace, tím menší je ztráta kinetické energie a materiál je tedy tvrdší. Viz. obr. 12. [11, 13]



Obr. 12 Princip dynamické zkoušky tvrdosti. E_{pot} – potenciální energie, E_{kin} – kinetická energie, d – průměr vpichu [11]

Kinetická energie je měřena nepřímo, pomocí elektromagnetické indukční cívky, indukované napětí po průletu kuličky je úměrné velikosti její rychlosti. Pokles energie je závislý na tvrdosti a modulu pružnosti zkoušeného materiálu. Na obrázku 13 je znázorněn úbytek kinetické energie kuličky po odraze od zkoušeného povrchu. Na tomto principu pracují tvrdoměry dle Leeba, který taky definoval svou vlastní jednotku tvrdosti, hodnotu Leeb – HL. Její hodnota je dána poměrem rychlosti vnikající kuličky před a po dopadu na

povrch. Tato jednotka však v praxi není využívána, proto je vždy nutno ji převést na jednotu běžně používanou (HB, HV, HRC, HRB, N/mm²). K tomuto převodu se využívají převodní tabulky/grafy. [11, 13]



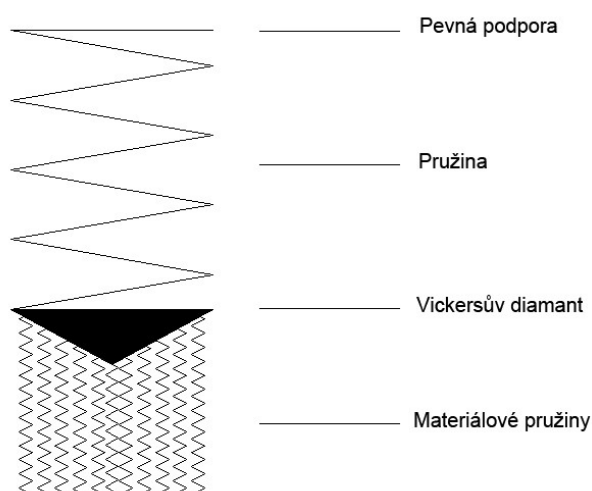
Obr. 13 Úbytek kinetické energie kuličky po odraze od zkoušeného materiálu [11]

2.2.3 Metoda Ultrazvuková (UCI)

Principem této metody je axiálně kmitající sonda, složená z Vickersova diamantového hrotu připojeného ke konci kovové tyčinky, kterou rozkmitávají piezoelektrické měniče na frekvenci přibližně 70kHz. Úhlopříčky vpichu, které jsou pro určení hodnoty dle Vickerse potřeba znát, jsou u této metody na rozdíl od klasické, kde jsou odečteny opticky, určeny plochou vpichu změřenou pomocí změny ultrazvukové frekvence při kontaktu tyčinky s povrchem materiálu. Změna frekvence je závislá na ploše vpichu a modulu pružnosti zkoušeného materiálu. [11, 14]

Princip této metody lze pro lepší pochopení popsat následovně. Místo kmitající tyčinky si představme velkou pružinu, jejíž jeden konec je pevně přichycen a na druhém, volném konci je umístěn Vickersův diamant kmitající o frekvenci 70kHz. Materiál, přicházející do styku s diamantem, si můžeme také představit jako soustavu menších pružin, orientovaných kolmo k měřenému povrchu. Pokud je i pouze jedna z těchto pružin diamantovým hrotem stlačena, pak je tato pružina akusticky spojena s velkou pružinou a tím změní její frekvenci kmitu. Změna frekvence je tím větší, čím víc působí diamantový hrot na ostatní pružiny nahrazující měřený materiál. Tzn. čím větší změna frekvence tím více dochází k deformaci zkoušeného materiálu a vpich bude větší. Největší změna frekvence a největší vpich tedy nastane u měkkých materiálů. Na obr. 14 je výše popsané znázorněno graficky. [11, 14]

Pro správnou funkci této metody musíme zajistit, aby kmitající sonda byla kolmo ke zkoušenému materiálu. Musíme také zajistit dobrou kvalitu povrchu (závislá na použitém zatížení sondy). Metoda je rychlá, přesná, umožňuje měření i v těžko přístupných místech a měření i velmi malých součástí. Při měření prakticky nedochází k poškození zkoušeného povrchu, proto je tato metoda vhodná pro kontrolu tvrdosti již hotových součástí, jako jsou evolventní povrchy ozubených kol, lopatky turbín apod.). Lze měřit i tenké součásti, tloušťky od 2-3mm a váhy od 0,3kg především jemnozrnných materiálů. Při měření menších součástí je třeba je akusticky spojit s povrchem větší součásti. Metoda je vhodná i pro měření tvrdosti v kritické oblasti svaru. [11, 14]



Obr. 14 Grafické znázornění principu UCI metody [11]

2.3 Výpočtové metody pro predikci tvrdosti

V oblasti svarů je zákazníky a výrobními postupy stále častěji vyžadováno omezení maximální dosažené tvrdosti. Jedná se zejména o tvrdost vrchní vrstvy svaru, kořenové oblasti a teplem ovlivněné oblasti. Tvrdost kovu je ovlivňována mnoha faktory. Kromě prvků přispívajících k substitučnímu zesílení nebo precipitačnímu vytvrzení slitiny se jedná i o tepelně mechanickou historii materiálu. Pokládání svarové housenky mění původní hranice v mikrostrukturu a zároveň vystavuje okolní materiál tepelnému cyklu, který obvykle mění mikrostrukturu a tvrdost materiálu. Nástroje pro predikci mohou pomoci při výběru vhodných postupů svařování v případech, kde je třeba zabránit mechanismu praskání – nutnost zjistit maximální tvrdost v TOO. To je důležité zejména ve fázi návrhu či úprav svarových spojů. Díky výpočtovým metodám je možné stanovit vliv malých i velkých změn ve složení základního materiálu nebo úprav svařovacích parametrů na tvrdost svarového spoje bez nutnosti zkoušení všech možných kombinací. Výpočtové metody však nejsou naprosto přesný způsob pro určení tvrdosti. Nejpresnější z nich dosahují přesnosti 28HV (v případě

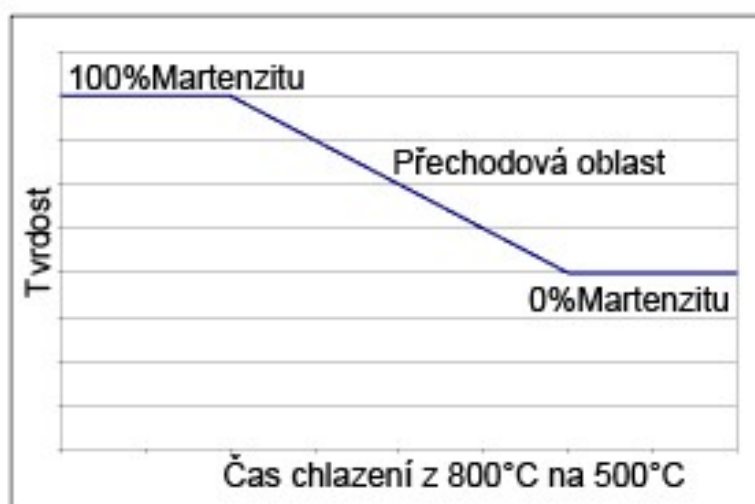
jednoprůchodových) nad nebo pod skutečnou hodnotu tvrdosti. To omezuje použití metod zejména pro určení faktorů, které jsou pro dosažení požadované tvrdosti nejdůležitější, ať už se jedná o složení oceli nebo svařovací parametry. Výpočtová predikce tedy nemůže nahradit proces testování, ale může napovědět, zda by mohl s použitým postupem svařování nastat problém. V případě, že byla maximální požadovaná tvrdost TOO v klasifikačním testu překročena, mohou být naměřené a predikované hodnoty srovnány spolu s provedením výpočtů pro označení úprav svařovacích parametrů, které by bylo potřeba upravit pro získání požadované maximální tvrdosti v teplem ovlivněné oblasti. [21, 22]

2.3.1 Predikce tvrdosti pro jednoprůchodové svary

Pro predikci maximální tvrdosti může být použito více modelů, při jejichž použití je možno dojít ke třem závěrům:

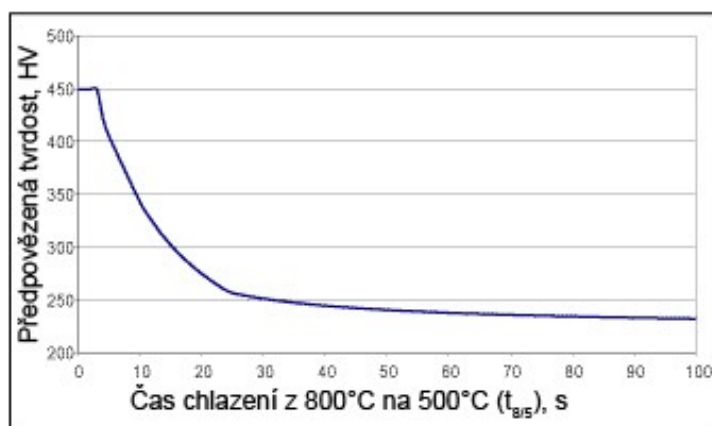
- maximální tvrdost, nízká $t_{8/5}$, 100% martenzitu
- minimální tvrdost, vysoká $t_{8/5}$, 0% martenzitu
- něco mezi těmito extrémy

Rostoucí $t_{8/5}$ má za následek pomalejší ochlazování, což vede ke snížení tvrdosti (snížené množství martenzitu) viz obr. 15. [21]

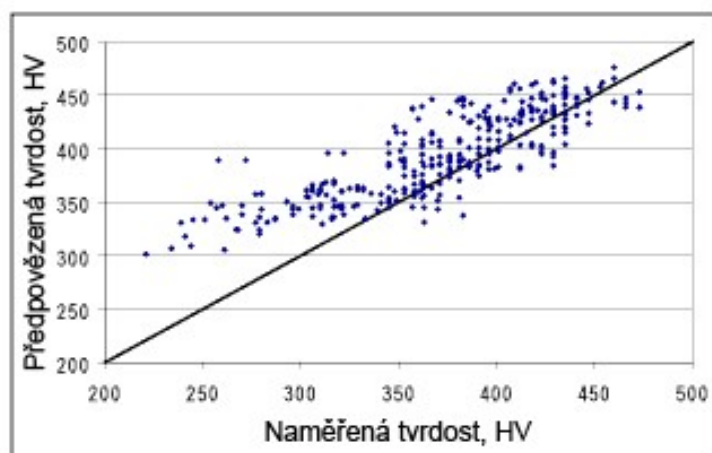


Obr. 15 Závislost tvrdosti na $t_{8/5}$ [21]

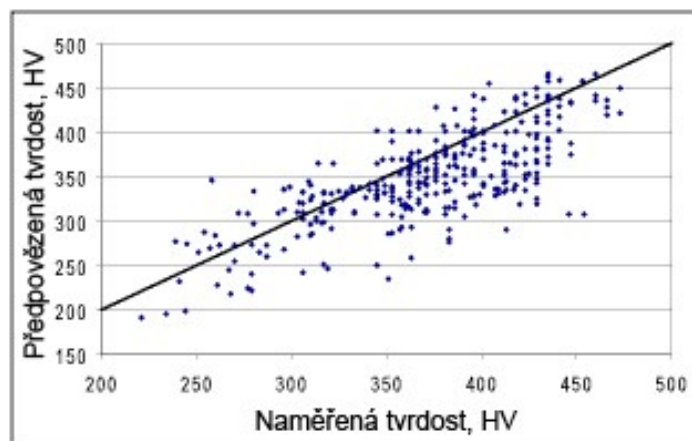
Pro dané složení se predikovaná tvrdost mění s $t_{8/5}$ způsobem zobrazeným na obrázku 16. [22]

Obr. 16 Závislost tvrdosti na $t_{8/5}$ [22]

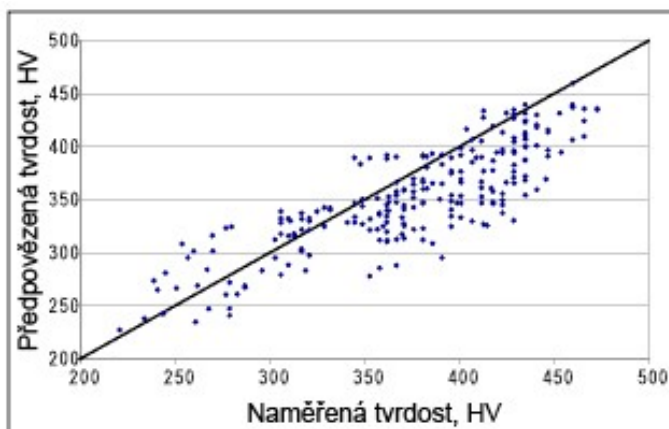
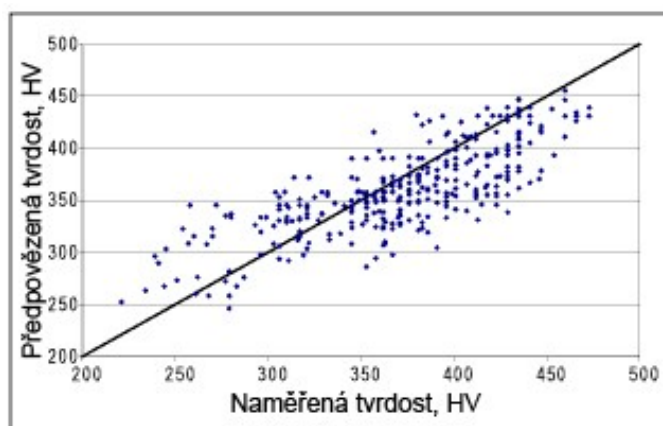
Grafická znázornění výsledků několika algoritmů s naměřenými hodnotami v poměru 1:1 jsou znázorněny na obrázcích 17 - 20. Každý algoritmus je jiný a je aplikován na omezený rozsah složení. Metoda použitá Yuriokym v roce 1981 stejně jako metoda Lorenze a Dürena dává oproti jiným metodám velmi dobré výsledky. [21]



Obr. 17 Algoritmus dle Yurioky [21]



Obr. 18 Algoritmus dle Lorenze a Dürena [21]

Obr. 19 *Algoritmus dle Suzukiho* [21]Obr. 20 *Algoritmus dle Terasakiho* [21]

Přehodnocení dat pomocí regresních metod spolu se zkoumáním kombinací různých existujících algoritmů vedlo k určení nejlepší shody dat a vytvoření společného algoritmu. Nejúspěšnější model pro predikci maximální tvrdosti jednorůchodového svaru je hybridní, kombinující metodu Lorenze a Dūrena s Yuriokyho metodou s vyrovnáním martenzitu. Tento hybridní model nejvíce odpovídal naměřeným údajům v daném místě a to s odchylkou 28HV. Predikce tvrdosti se sice zlepšila, ale kombinací těchto metod byla ztracena maximální martenzitická a minimální bainitická tvrdost. Bylo konstatováno, že s rostoucí $t_{8/5}$ může bainit pokračovat ve změkčení, a že maximální tvrdost martenzitu je potřeba nově koncipovat. Použitím hodnoty $t_{8/5}$ pro získání maximální tvrdosti v modelu Lorenze a Dūrena byla stanovena jediná hodnota tvrdosti martenzitu pro kombinovaný model. Kombinovaný model tedy vyžaduje hodnotu $t_{8/5}$ (čas potřebný k ochlazení z 800°C na 500°C), kterou můžeme určit ze svařovacích parametrů pro použití na nové uspořádání Rosenthalových rovnic daných normou EN1011-2. Pokud tedy známe složení oceli a svařovací parametry, může být odhad maximální tvrdosti TOO pro jednorůchodový svár (nebo poslední housenku víceprůchodového svaru) odvozen od této metody. V případech,

kde je nutno dodržet zadanou maximální tvrdost TOO, by měl tento postup výrazně snížit počet testů potřebných pro vyhodnocení kvality svaru. Grafická znázornění hybridního modelu kombinujícího metodu Lorenze a Dūrena s Yuriokyho metodou jsou znázorněny na obrázcích 21 a 22, plný algoritmus je následující [21]:

Pro $t_{8/5} \leq t_m$

$$t_m = 10^{\left(\frac{611,3C + 605,7C_{eq} - 239}{1009,5C + 52,8}\right)} \quad (1)$$

$$HV_m = \frac{1}{2} \langle 802C + 305 + 406C + 164CE_I + 183 + (369C - 149CE_I + 100) \tan^{-1} \left(\frac{\log_{10} t_m - 2,822CE_{II} + 0,262}{0,526 - 0,195CE_{II}} \right) \rangle \quad (2)$$

Pro $t_{8/5} \geq t_b$

$$t_b = 10^{\left(\frac{1413,3C + 300,7C_{eq} - 35}{1009,5C + 52,8}\right)} \quad (3)$$

$$HV = \frac{1}{2} \langle 305C_{eq} + 101 + 406C + 164CE_I + 183 + (369C - 149CE_I + 100) \tan^{-1} \left(\frac{\log_{10} t_{8/5} - 2,822CE_{II} + 0,262}{0,526 - 0,195CE_{II}} \right) \rangle \quad (4)$$

Pro $t_m < t_{8/5} < t_b$

$$HV = \frac{1}{2} \langle 2019[C(1 - 0,5\log_{10} t_{8/5}) + 0,3(C_{eq} - C)] + 66(1 - 0,8\log_{10} t_{8/5}) + \frac{1}{2} \langle 406C + 164CE_I + 183 + (369C - 149CE_I + 100) \tan^{-1} \left(\frac{\log_{10} t_{8/5} - 2,822CE_{II} + 0,262}{0,526 - 0,195CE_{II}} \right) \rangle \rangle \quad (5)$$

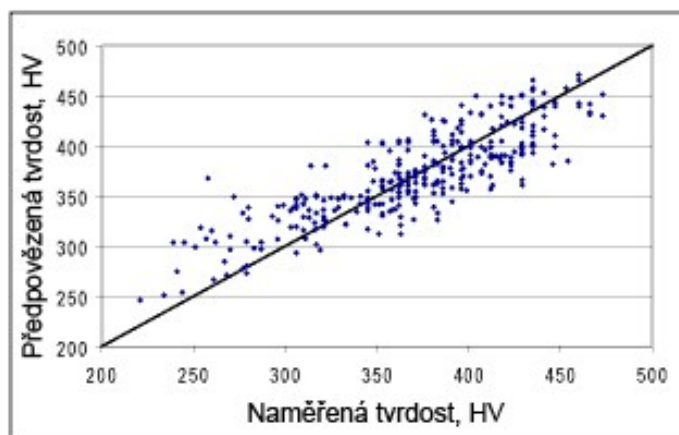
Kde C je obsah uhlíku v %

$$C_{eq} = C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \quad (6)$$

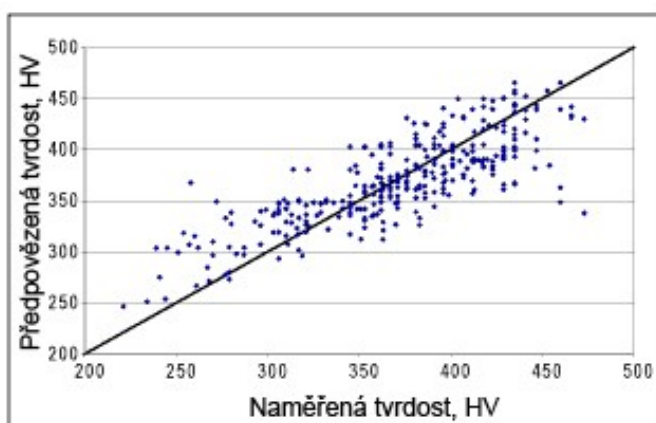
$$CE_I = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{5} + 10B \quad (7)$$

$$CE_{II} = C - \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{5} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{6} + 10B \quad (8)$$

Obsahy všech prvků v %



Obr. 21 Kombinovaný algoritmus bez vyrovnání martenzitu [21]



Obr. 22 Kombinovaný algoritmus s vyrovnáním martenzitu [21]

Pro kontrolu analytických výpočtů je možno použít výsledky z neuronové sítě. Zkoumáním dat z neuronové sítě lze zjistit určité zkreslení údajů (s ohledem na některé proměnné), které se pohybuje mezi 26-30HV. Nejlepší vztah mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou má v případě neuronových sítí standardní odchylku 26HV, což je velmi blízko kombinovanému empirickému vzorci. Nedá se tedy předpokládat, že by použitím většího souboru dat vyplynulo jakékoli zlepšení predikce. [21]

Rozptyl hodnot vypočítaných od naměřených může být způsoben [21]:

- chyby v koeficientech používaných ve vzorcích pro uhlíkový ekvivalent

- chyby v měření času ochlazování, ze kterých byly odvozeny empirické rovnice
- nedostatek údajů pro plnou charakteristiku empirických rovnic pro daný rozsah $t_{8/5}$
- experimentální chyby v naměřených údajích (stanovení maximální tvrdosti nebo měření $t_{8/5}$)
- vliv prvků, které nejsou zahrnuty v empirických rovnicích (precipitáty Ti a obsah síry)

2.3.2 Predikce tvrdosti pro víceprůchodové svary

V předchozí kapitole byly popsány algoritmy pro predikci maximální tvrdosti TOO v jednopřechodových svarech. V praxi se však setkáváme většinou s víceprůchodovými svary. Víceprůchodové svařování, na rozdíl od jednopřechodového, vystavuje části svařence opakovaným tepelným cyklům. To může vést ke zvýšení tvrdosti, kde počáteční mikrostruktura neobsahuje velké množství martenzitu a ocel obsahuje sekundární zpevňovací prvky. Víceprůchodové svařování lze tedy považovat za velmi rychlý proces tepelného zpracování po svařování. Pro aplikace, kde je vyžadována určitá maximální tvrdost TOO, může její predikce a vliv změn svařovacích parametrů znamenat značnou úsporu času i nákladů. V této kapitole bude tedy prezentován semiempirický způsob stanovení maximální tvrdosti v teplem ovlivněné oblasti. [22]

Aby bylo možné stanovit maximální tvrdost v teplem ovlivněné oblasti, je třeba vzít v úvahu řadu faktorů. Při víceprůchodovém svařování dochází v materiálu k řadě tepelných cyklů, které se od sebe liší jak svařovacími parametry, tak vzdáleností od svarové lázně. To způsobuje složitou mikrostrukturu a následné rozložení tvrdosti. V jednopřechodovém svaru je tvrdost podél TOO popsána pomocí složení základního materiálu a svařovacími parametry (nebo parametrem $t_{8/5}$, zaznamenaným během svařování). Tvrdost TOO se s rostoucí vzdáleností od oblasti tavení snižuje. Vliv teplot od víceprůchodového svarového spoje by mohl být považován za několik anisotermálních tepelných zpracování po svařování. Empirická metoda pro stanovení změny tvrdosti po tepelném zpracování, kterou se budu následně zabývat, byla vytvořena Okamurou. V této metodě bylo použito složení materiálu a k popisu teplotního cyklu vznikajícího při svařování tzv. Hollomon-Jaffe parametr (HJP). Pro výpočet predikce tvrdosti ve více průchodových svarech tedy potřebujeme znát maximální tvrdost TOO po svaření 1. housenky a její následné ovlivnění druhou housenkou, příp. TZ, které charakterizuje HJP. [22]

Hollomon-Jaffe parametr (HJP)

V tomto parametru jsou kombinovány parametry používané k popisu cyklu tepelného zpracování (rychlost ohřevu, teplota, setrvání na teplotě a rychlost ochlazování). Tímto parametrem lze v zásadě popsat dílčí část svařovacího cyklu. Pro daný soubor podmínek svařování můžeme tepelný cyklus svařování odhadnout z Rosenthalových rovnic na různých místech od středové linie svaru. Získáme stanovení tepelného profilu s ohledem na čas. Účinná HJP pro dílčí teplotní cykly může být hodnocena popisem teplotního profilu takto [22]:

Pro teplotní cyklus první housenky ($t=t_0$, $T=T_0$):

$$HJP_0 = \frac{T_0(20 + \log_{10} t_0)}{1000} \quad (9)$$

$$teff_0 = 10^{\left(\frac{1000 HJP_0}{T_1} - 20\right)} \quad (10)$$

Pro teplotní cyklus druhé housenky ($t=t_1$, $T=T_1$):

$$HJP_1 = \frac{T_1(20 + \log_{10}(teff_0 + t_1 - t_0))}{1000} \quad (11)$$

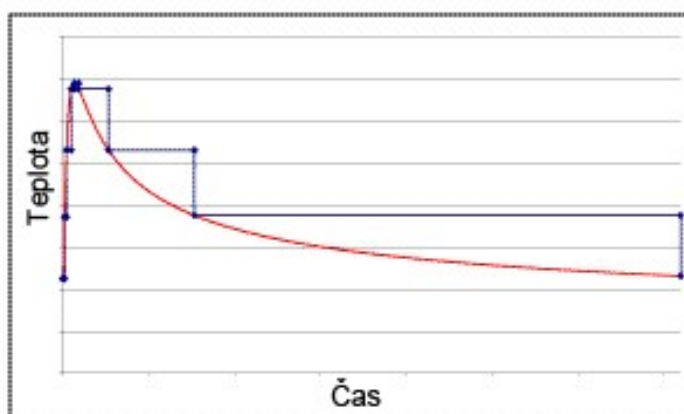
$$teff_1 = 10^{\left(\frac{1000 HJP_1}{T_2} - 20\right)} \quad (10)$$

Pro teplotní cyklus n-té housenky ($t=t_n$, $T=T_n$):

$$HJP_n = \frac{T_n(20 + \log_{10}(teff_{n-1} + t_n - t_{n-1}))}{1000} \quad (11)$$

Kde t je čas v hodinách a T je teplota v Kelvinech

Postupné hodnocení HJP přehodnocuje efektivní čas na další teplotě a předpokládá okamžitý čas na tuto teplotu, jak je ve zvětšené formě zobrazeno na obrázku 23.[22]



Obr. 23 Postupné hodnocení HJP [22]

Stanovení tvrdosti TOO první svarové housenky

Maximální tvrdost TOO první svarové housenky lze stanovit použitím postupu popsaným v předchozí kapitole pomocí rovnic 1-8. Využívá složení základního materiálu a $t_{8/5}$ určený pro první průchod. [22]

Stanovení tvrdosti TOO druhé a dalších svarových housenek

Po druhém nebo dalších průchodech je pro odhad maximální tvrdosti TOO použita metoda předložená Okamurou. [22]

$$HV = HV_{weld} - \Delta HV \quad (12)$$

Kde HV_{weld} je maximální tvrdost po svaření a ΔHV je změna tvrdosti jako výsledek následného tepelného zpracování. [22]

$$\Delta HV = (884C + 177 - 197CE_{III} + 16,5(HJP - 21,5))M + (18(HJP - 18)^2 - 138)V^{1/2} + (20(HJP - 18)^2 - 268)Nb^{1/2} + (25(HJP - 17,3)^2 - 55)Mo^{1/2} - 7CE_{III} + 26 \quad (13)$$

$$M = 0,5 - 0,455 \arctan(x) \quad (14)$$

$$x = 4 \log_{10} \left(\frac{t_{8/5}}{t_m} \right) / \log_{10} \left(\frac{t_b}{t_m} \right) - 2 \quad (15)$$

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} \quad (16)$$

$T_{8/5}$, t_m a t_b se týkají počátečních hodnot tvrdosti po svařování.

3 Experimentální část

Praktická část práce je věnována návrhu a realizaci experimentálního programu pro ověření maximální tvrdosti TOO svarových spojů Cr-Mo ocelí v závislosti na použitém teplotním režimu svařování. Cílem experimentální části je tedy stanovit, jak a do jaké míry ovlivňuje použitý teplotní režim svařování výslednou maximální tvrdost TOO svarového spoje. Dalším předmětem experimentální části je ověření funkčnosti a přesnosti tří výpočtových modelů pro predikci maximální tvrdosti TOO svarového spoje. Jedním z nich je výpočtový model, vytvořený v počítačovém programu Microsoft Excel vycházející z algoritmů uvedených v předchozí kapitole. Druhým je počítačový program WeldSoft 2, jehož autory jsou Billy Chan a Malcom Bibby pod Carletonskou univerzitou v Kanadě v letech 1989-1995. Posledním výpočtovým modelem, který bude zkoušen je výpočtový model na webu JWES (viz. [24]), založený na výpočtu podle Yurioky, který uvedl v práci "Prediction of HAZ hardness of steels" v roce 1987. Web byl zároveň použit i pro výpočet času $t_{8/5}$ pro předchozí výpočtové modely. Za účelem ověření bylo vytvořeno celkem 16 vzorků svarových spojů z ocelí P91 a 15 128 s jedno nebo dvouhousenkovým svarem, z nichž každý byl podroben jinému teplotnímu režimu svařování. Vzorky se tedy od sebe odlišovaly základním materiálem (odlišné svařovací parametry), počtem průchodů, teplotou přehřevu a použitým tepelným zpracováním.

3.1 Základní materiály a metoda svařování

3.1.1 Použité základní materiály

Vzorky pro experiment byly vytvořeny z trubek z ocelí P91 a 15 128, jejichž popis a vlastnosti jsou uvedeny v kapitolách 1.3 a 1.4 a jejich chemické složení uvedeno v tabulkách č. 1 a 2. Rozměry trubek, ze kterých byly vytvořeny vzorky, byly před rozdělením následující:

Materiál	Průměr trubky [mm]	Délka trubky [mm]	Tloušťka stěny [mm]
P91	22,7	200	5
15 128	30	200	6,3

Tab. 5 Rozměry vzorků pro experiment

3.1.2 Použitá metoda svařování

Vzorky byly svařeny ručně a ve všech případech byla použita metoda svařování č. 141, která je také známa jako TIG/WIG nebo GTAW. Jedná se o metodu svařování netavicí se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. Wolframová elektroda je upnuta v hlavici svařovacího hořáku pomocí kleštiny, kterou je do elektrody zároveň přenášén svařovací proud. Hořák je dále opatřen hubicí, kterou je ke svarové lázni přiváděn

inertní ochranný plyn, většinou Argon. Svařování může být provedeno buď pouze roztavením a slitím obou základních materiálů nebo přidáním přídatného materiálu. [26]

Při svařování vzorků byl použit přídatný materiál z produktů firmy ESAB Vamberk a to konkrétně OK TIGROD 316LSi, jehož chemické složení je uvedeno v tabulce č. 6. Průměr přídatného materiálu byl 2mm.

C [%]	Si[%]	Mn[%]	Cr[%]	Ni [%]	Mo[%]
<0,03	0,80	1,8	19,0	12,0	2,8

Tab. 6 Chemické složení příd. mat. OK TIGROD 316LSi [25]

Svařovací parametry jsou pro každý vzorek uvedeny v souhrnné tabulce svařovacích parametrů (tabulka č. 7)

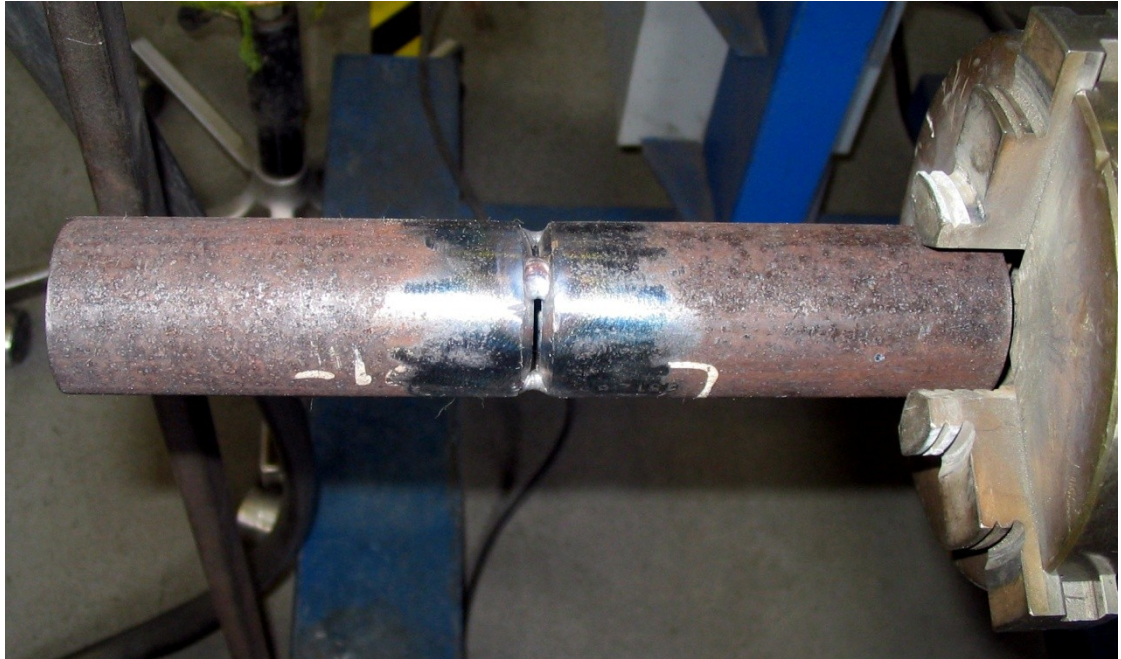


Obr. 24 Svařování trubek na vzorky metodou TIG

3.2 Příprava vzorků a postup měření

Pro experiment byly svařeny dvě trubky z oceli P91 a dvě z oceli 15 128. Před svařením byly svarové hrany nejdříve upraveny, očištěny a nastehovány (obr. 25), poté byla každá trubka po obvodu svařena jedním průchodem (obr. 26) a následně na $\frac{1}{2}$ délky první housenky navařena druhá (obr. 27). Svařené trubky byly nařezány kotoučovou pilou (obr. 29). Na obr. 28 je přehledně znázorněno rozdělení každé ze svařených trubek na jednotlivé

vzorky. Z každé svařené trubky (2x P91 a 2x 15 128) byly vytvořeny 4 vzorky, z nichž 2 byly svařeny jedním průchodem a 2 dvěma průchody (obr. 30). Z každé trubky byla poté jedna část s jedním průchodem a jedna část se dvěma průchody tepelně zpracována (Žíhání na teplotě 740°C po dobu 1h). Každý vzorek byl upraven pro měření tvrdosti a naleptán leptadlem dle Adlera pro zviditelnění jednotlivých oblastí svaru (TOO, SK, ZM).



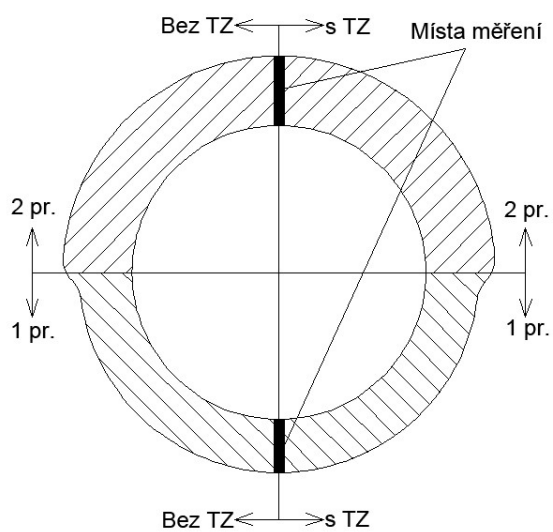
Obr. 25 Úprava a očištění svar. ploch + nastehování



Obr. 26 Svaření trubky 1. průchodem



Obr. 27 Hotový svarový spoj na jedné z trubek



Obr. 28 Schematické rozdělení trubky na jednotlivé vzorky

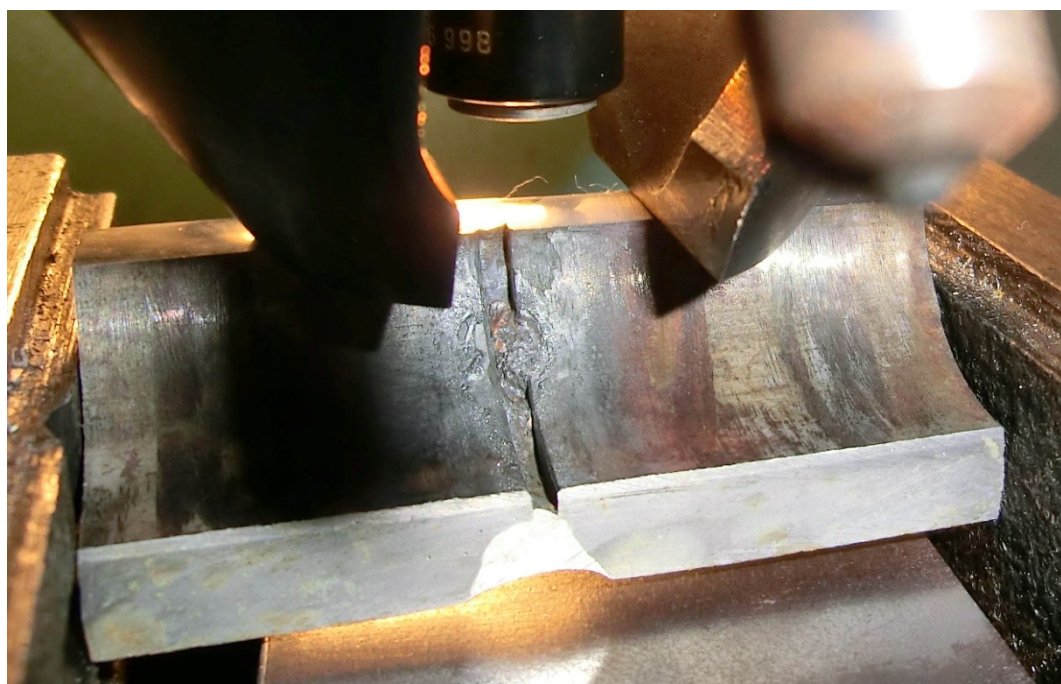


Obr. 29 Dělení vzorků na kotoučové pile

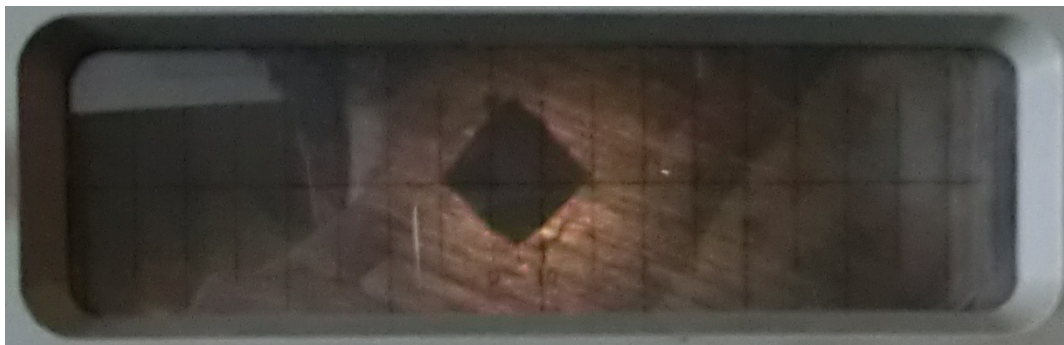


Obr. 30 Nadělené vzorky

Připravené vzorky byly poté ustaveny do svěráku a na tvrdoměru změřena tvrdost HV10 v TOO co nejbližže hranice ztavení dle normy ČSN EN ISO 9015-1 (obr. 31 a 32). Z naměřených hodnot byly následně vyškrtnuty extrémy, hodnoty tvrdosti zprůměrovány a zapsány do tabulky k danému vzorku. Tyto hodnoty byly poté srovnány s hodnotami predikovanými programem v Excelu a WeldSoftem. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a navzájem porovnány vzhledem k použitému teplotnímu režimu svařování a zhotovena srovnávací tabulka hodnot naměřených tvrdostí. (tab. 9).



Obr. 31 Upnutý vzorek při měření tvrdosti



Obr. 32 Umístění vpichu u hranice ztavení

3.3 Charakteristické údaje vzorků a výsledky tvrdostí

V následující kapitole jsou popsány charakteristické údaje pro jednotlivé vzorky (materiál, svařovací parametry, počet průchodů, TP, TZ) a také výsledky predikovaných a naměřených tvrdostí.

3.3.1 Materiály a svařovací parametry

Č. vzorku	Materiál	Počet průchodů	Sv. par. - 1. průchod		Sv. par. -2. průchod		Rychlost sv. [cm.min ⁻¹]	Účin. sv.
			Proud [A]	Napětí [V]	Proud [A]	Napětí [V]		
1	15 128	1	107	12,6	-	-	7	0,4
2	15 128	2	107	12,6	121	12,8	7	0,4
3	P91	1	107	12,5	-	-	7	0,4
4	P91	2	107	12,5	121	12,8	7	0,4
5	15 128	1	107	12,6	-	-	7	0,4
6	15 128	2	107	12,6	121	12,8	7	0,4
7	P91	1	107	12,5	-	-	7	0,4
8	P91	2	107	12,5	121	12,8	7	0,4
9	15 128	1	107	12,6	-	-	7	0,4
10	15 128	2	107	12,6	121	15,4	7	0,4
11	P91	1	107	12,5	-	-	7	0,4
12	P91	2	107	12,5	121	15,4	7	0,4
13	15 128	1	107	12,6	-	-	7	0,4
14	15 128	2	107	12,6	121	15,4	7	0,4
15	P91	1	107	12,5	-	-	7	0,4
16	P91	2	107	12,5	121	15,4	7	0,4

Tab. 7 Materiály a svařovací parametry

3.3.2 TP a TZ použité u vzorků

Č. vzorku	TP[°C]	TZ			
		Rychl. ohřevu [°C.h ⁻¹]	Teplota[°C]	Čas[h]	Rychl. ochl.[°C.h ⁻¹]
1	150	150-200	740	1	200-250
2	150	150-200	740	1	200-250
3	150	150-200	740	1	200-250
4	150	150-200	740	1	200-250
5	150	-	-	-	-
6	150	-	-	-	-
7	150	-	-	-	-
8	150	-	-	-	-
9	250	150-200	740	1	200-250
10	250	150-200	740	1	200-250
11	250	150-200	740	1	200-250
12	250	150-200	740	1	200-250
13	250	-	-	-	-
14	250	-	-	-	-
15	250	-	-	-	-
16	250	-	-	-	-

Tab. 8 Teplota předehřevu a tepelné zpracování

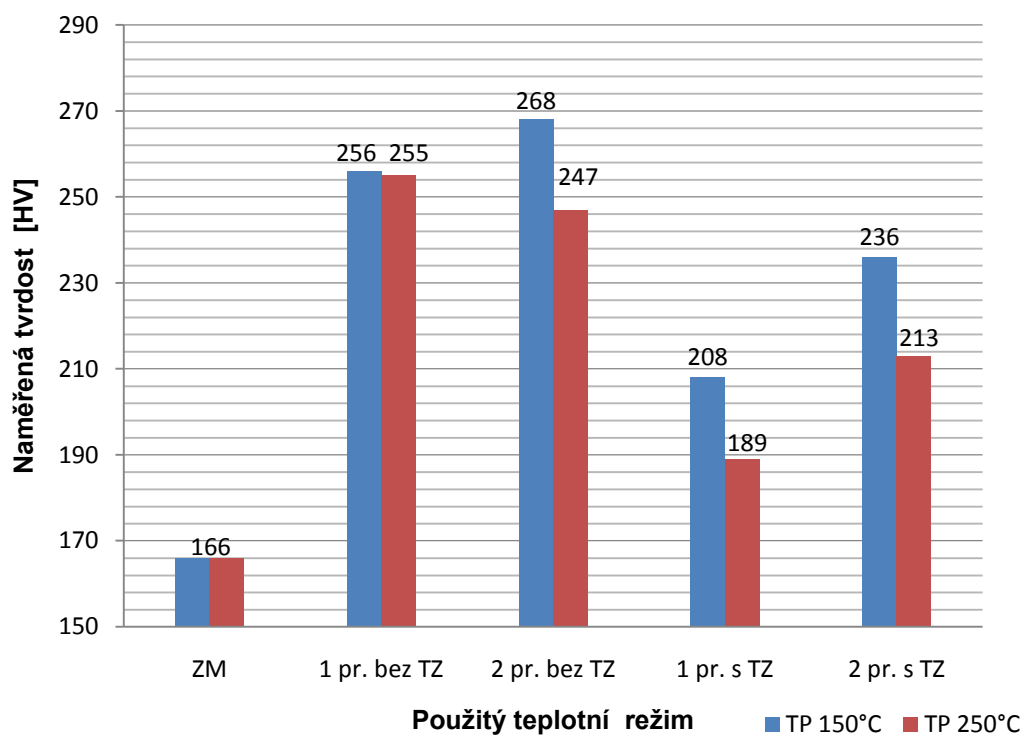
3.3.3 Výsledky naměřených a predikovaných tvrdostí

Č. vzorku	Predikovaná tvrdost [HV]				Naměřená tvrdost [HV]	
	Excel		Weldsoft			
	1. průchod	2. průchod	1. průchod	2. průchod	1. průchod	2. průchod
1	-13	-	141	-	208	-
2	-	-	-	-	-	236
3	639	-	678	-	264	-
4	-	-	-	-	-	428
5	311	-	320	-	256	-
6	-	-	-	-	-	268
7	377	-	334	-	376	-
8	-	-	-	-	-	431
9	1	-	136	-	189	-
10	-	-	-	-	-	213
11	664	-	678	-	221	-
12	-	-	-	-	-	271
13	327	-	277	-	255	-
14	-	-	-	-	-	247
15	404	-	334	-	412	-
16	-	-	-	-	-	415

Tab. 9 Výsledky tvrdosti

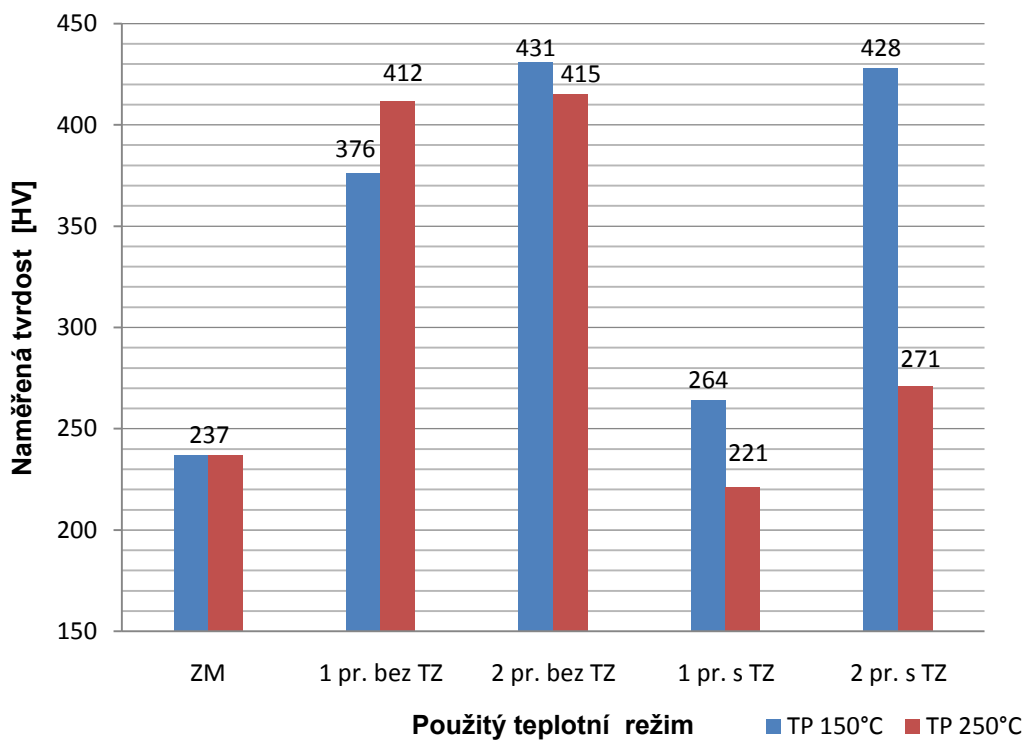
V grafech č 1 a 2 jsou znázorněny výsledky měření pro danou ocel a použitý teplotní režim svařování.

Grafické znázornění naměřených tvrdostí oceli 15 128



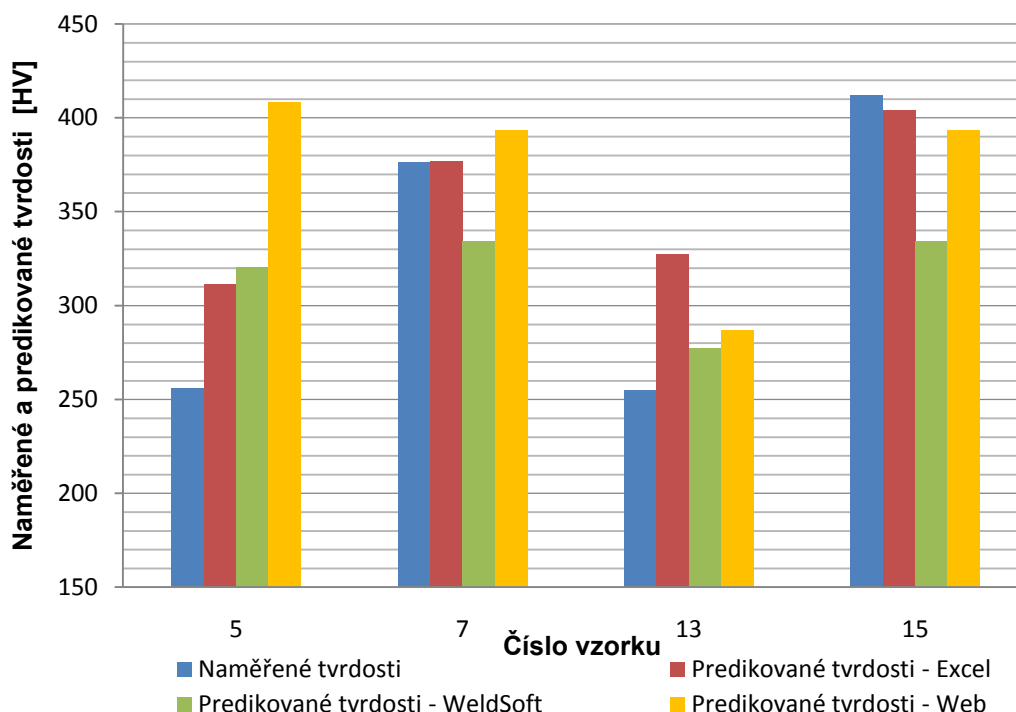
Graf 1 Grafické znázornění naměřených tvrdostí oceli 15 128

Grafické znázornění naměřených tvrdostí oceli P91



Graf 2 Grafické znázornění naměřených tvrdostí oceli P91

V grafu č. 3 je znázorněno porovnání naměřených a predikovaných hodnot tvrdosti pomocí použitých výpočtových modelů. Jedná se o vzorky s jednou svarovou housenkou a nepodrobené TZ, u kterých dopadla predikce tvrdosti nejpřesněji. U jiných vzorků se nepodařilo predikcí přiblížit naměřeným hodnotám, jak je popsáno v následné diskusi.



Graf 3 Porovnání naměřených a predikovaných hodnot tvrdosti

3.3.4 Diskuse výsledků měření

Porovnáním naměřených hodnot lze zjistit, že použitím vyšší teploty předehřevu (250°C oproti 150°C) bylo dosaženo nižších tvrdostí a to průměrně o HV 30. Je to způsobeno zvýšením času $t_{8/5}$ a tím snížení množství martenzitu ve struktuře. Jedinými vzorky, kde byl při jejich porovnání zjištěn opak, byly vzorky 7 a 15, kde bylo při použití vyšší TP naměřeno zvýšení tvrdosti o hodnotu 37. To bylo s největší pravděpodobností způsobeno vyřazením nejvyšších naměřených hodnot z používaného souboru dat u vzorku 7. Při jejich použití bylo snížení tvrdosti také dosaženo. Měřením bylo potvrzeno, že použití TZ vedlo u všech vzorků ke snížení tvrdosti průměrně o HV 79. Dále bylo zjištěno, že použitím druhé svarové housenky došlo ke zvýšení tvrdosti a to průměrně o hodnotu 41. Jedinými vzorky, u kterých použití 2. svarové housenky vedlo ke snížení tvrdosti, byly vzorky 13 a 14. Snížení tvrdosti bylo však pouze o HV 8, což bylo nejspíše způsobeno nepřesnostmi při měření. Podařilo se tedy potvrdit vznik sekundárních zpevňovacích prvků vznikajících při pokládání 2. svarové housenky. Při srovnání naměřených výsledků s údaji v literárních pramenech můžeme

potvrdit, že TZ proběhlo v pořádku a že použité teplotní režimy ovlivnily výslednou tvrdost podle trendů, které byly v literatuře uvedeny.

3.3.5 Diskuse výsledků predikce tvrdostí

Nejlépších výsledků se u predikovaných hodnot tvrdosti podařilo v případě všech použitých výpočtových modelů dosáhnout u vzorků, u kterých byla položena pouze jedna svarová housenka a nebyly tepelně zpracované, tzn. vzorky č. 5, 7, 13 a 15. Průměrné odchylky predikovaných a naměřených hodnot byly u těchto vzorků: HV 34 – Excel; HV 51 – WeldSoft; HV 55 – Web. Nejlépe ze všech zkoušených výpočtových modelů tedy dopadl model vytvořený v Excelu. U vzorků s více průchody a/nebo s TZ se funkčnost výpočtových modelů nedala v této přímé podobě potvrdit.

Podrobněji k výsledkům, získaným výpočtovým modelem v Excelu. Tento model dokáže celkem dobře predikovat výslednou tvrdost u spojů neovlivněných po 1. průchodu žádným dalším teplotním cyklem. Vzorce použité v tomto modelu pro výpočet tvrdosti po více průchodech jsou analytické a aby fungovaly pro predikci tvrdosti u tepelně zpracovaných vzorků, musely by být upraveny. Jejich nefunkčnost i u víceprůchodových svarů je s největší pravděpodobností způsobena vhodností těchto modelů pouze pro uhlíkové oceli s minimálním množstvím legujících prvků. Pro jejich použití na více legované oceli, jako jsou právě Cr-Mo oceli by proto musely být upraveny, zejména výpočet uhlíkových ekvivalentů.

Program WeldSoft 2 při zadání svařovacích parametrů nepočítá korektně časy $t_{8/5}$, ze kterých následně vychází při výpočtu tvrdosti. Z tohoto důvodu byly do programu hodnoty $t_{8/5}$ zadány experimentálně a to stejné, jako byly zadány do programu v Excelu. Hodnoty predikovaných tvrdostí u vzorků 5, 7, 13 a 15 se tím oproti původním přiblížily naměřeným hodnotám. Při výpočtu tvrdosti spojů po TZ byly výsledky chybné podobně jako v Excelu. Důvodem pro nepřesnou predikci v programu WeldSoft 2 je s největší pravděpodobností jeho neschopnost, i při odstranění limitů, přijmout vyšší obsahy některých prvků obou ocelí. Dále také neschopnost přijmout vyšší teploty TZ než 650°C a čas TZ kratší než jednu hodinu. Toto je zároveň i důvodem jeho nepoužitelnosti pro predikci tvrdosti u víceprůchodových svarů.

Výpočtový model umístěný na webu JWES je určený pouze pro predikci tvrdosti svarových spojů neovlivněných tepelným cyklem více svarových housenek nebo TZ. Model je vytvořený na základě algoritmů vytvořených Yuriokou uvedených v jeho práci "Prediction of HAZ hardness of steels" z roku 1987. Tento model podobně jako WeldSoft nedokázal přijmout obsahy některých prvků obou ocelí, počítal však korektně časy $t_{8/5}$ ze zadaných

svařovacích parametrů. Časy $t_{8/5}$ používané při výpočtu v předchozích dvou modelech byly proto použity právě z tohoto.

Výpočtové metody pro predikci tvrdosti v TOO svarových spojů (zejména spojů ovlivněných více teplotními cykly) je tedy potřeba podrobit dalšímu, rozsáhlejšímu testování. V literatuře, ze které bylo při tvorbě vycházeno, testovali její autoři použité výpočtové metody na více než 300 měřeních. Pro jejich experimentální ověření by proto bylo také potřeba výrazně zvětšit soubor naměřených dat.

Závěr

Předložená BP se zabývá aktuální problematikou vlivu teplotního režimu svařování na výslednou tvrdost svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí. Cr-Mo oceli byly známy již před druhou světovou válkou a od té doby využívány zejména v energetickém průmyslu. V současné době známe již celou řadu Cr-Mo ocelí. Některé z nich jsou již nahrazeny, příp. nahrazovány modernějšími. Vývoj nových druhů ocelí je způsoben neustálým zvyšováním nároků, které jsou na ně kladeny. Aby však tomuto zvyšování nároků vyhovovaly, musela by jejich tloušťka neustále vzrůstat, což by znamenalo jejich ekonomickou nevýhodnost. Hlavní výhodou Cr-Mo ocelí je creepová odolnost, tzn. schopnost dlouhodobě odolávat vysoké provozní teplotě a zatížení, aniž by došlo k jejich deformaci.

V kapitole 1.2 byly popsány vybrané druhy Cr-Mo ocelí. Uvedeny byly jejich vlastnosti, materiály, ze kterých byly vyvinuty a jejich výhody oproti nim. V kapitolách 1.3, 1.4 a 1.5 byla věnována pozornost konkrétně oceli P91, 15 128 a jejich heterogenním spojům. Hlavním problémem heterogenních spojů těchto dvou ocelí je jejich rozdílné chemické složení. Přídavné materiály se proto volí tak aby snížily rozdíl chemických potenciálů obou ocelí nebo materiály vytvářející difuzní bariéru.

Kapitola 2 je věnována zkouškám tvrdosti svarových spojů a výpočtovým modelům pro jejich predikci. Tvrdost sice není parametr, jehož určením by bylo zcela známo chování svarového spoje, ale dokáže nám ho alespoň přiblížit. Stanovení limitních hodnot tvrdosti v TOO je také jedním z kvalitativních kritérií dodržení vhodného teplotního režimu svařování. Jedná se o jednoduchou a rychlou kontrolu. Např. použití TZ sníží maximální tvrdost vždy o určitou hodnotu. V případě, že nebude korektně proveden technologický postup svařování (předehřev, dohřev, teplota interpass), nemusí závěrečné TZ snížit tvrdost na požadovanou hodnotu. Příliš vysoká tvrdost v TOO svarového spoje může v provozu způsobit vznik trhlin a následně úplné zničení součásti. Výslednou tvrdost svarového spoje tedy dokáže použitý teplotní režim svařování výrazně ovlivnit, což bylo předmětem experimentální části. Destruktivní zkoušky tvrdostí svarových spojů určuje norma ČSN EN ISO 9015-1 a to buď metodou řady vtisků nebo jednotlivými vtisky. Mezi nedestruktivní zkoušky tvrdosti se řadí například metoda optická TIV, dynamická odrazová a ultrazvuková. Výhodou výpočtových algoritmů pro predikci tvrdosti je odpadnutí značně finančně i časově náročného experimentálního zkoušení vlivu různých kombinací chemického složení nebo svařovacích parametrů na výslednou maximální tvrdost svarového spoje. Každý výpočtový algoritmus, který dokáže snížit požadavky na experiment je tedy velmi přínosný a žádaný. I když výpočtové metody nedovedou predikovat tvrdost zcela přesně (odchylka u nejlepších z nich dosahuje $\pm 28\text{HV}$) a nedovedou zcela nahradit proces testování, mohou napovědět, zda by mohl s použitým postupem svařování nastat problém.

V experimentální části práce byl ověřen vliv použitého teplotního režimu svařování na výslednou tvrdost svarových spojů Cr-Mo ocelí. Z trubek z oceli P91 a 15 128 bylo vytvořeno celkem 16 vzorků svarových spojů podrobených různým teplotním režimům svařování (rozdílná TP, počet svarových housenek a TZ). Jak je uvedeno v diskusi naměřených výsledků, byly měření potvrzeny trendy, uvedené v literatuře. Zvýšená TP způsobila snížení výsledné tvrdosti, stejně jako použití TZ. Aplikace druhé svarové housenky však naopak způsobila vznik sekundárních zpevňovacích prvků a výsledná tvrdost spoje byla vyšší.

Dalším předmětem experimentální části bylo ověření funkčnosti a přesnosti několika výpočtových modelů pro predikci tvrdosti. Zkoušen byl výpočtový model vytvořený v programu Microsoft Excel na základě algoritmů z kapitoly 2.3, dále počítačový program WeldSoft 2 a výpočtový model na webu JWES [24]. U jednorůchodových svarů, neovlivněných TZ byla funkčnost těchto výpočtových modelů potvrzena. V tomto případě se výsledky výpočtů shodovaly s experimentem. Nepodařilo se sice dosáhnout tak dobrých výsledků, jakých bylo dosaženo v literatuře ale vzhledem k množství měření, které byly provedeny je přiblížení naměřeným hodnotám dostačující. Funkčnost těchto modelů pro predikci tvrdosti u víceprůchodových svarů nebo svarů ovlivněných TZ se prokázat nepodařila. Funkčnost výpočtových modelů pro výpočet tvrdosti u tepelně zpracovaných svarů, příp. svarů víceprůchodových bude třeba dořešit v některé další práci modifikací výpočtových algoritmů. Díky této práci bude však další ověření výpočtových modelů podstatně urychleno.

Seznam použitých pramenů

- [1] HILKES, Jan a Volker GROSS. BÖHLER SCHWEISSTECHNIK. *Welding CrMo steels for Power Generation and Petrochemical Applications: Past, Present and Future*. Germany, 2009.
- [2] BÖHLER SCHWEISSTECHNIK. *Welding filler metals for power plant engineering*. Germany.
- [3] Ověření vlastností svarového spoje ocelí P91 a 15128 po dlouhodobé teplotní expozici. SCHWARZ, D., J. KOUKAL a M. SONDEL. KONSTRUKCE: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství [online]. 11.11.2010 [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/overeni-vlastnosti-svaroveho-spoje-oceli-p91-a-15128-po-dlouhodobte-teplotni-expozici/>
- [4] HENNHOFFER, K. a A. JAKOBOVÁ. VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE MODIFIKOVANÉ 9% Cr OCELI (P 91) S NÍZKOLEGOVANOU CrMoV OCELÍ (15 128). Ostrava. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_00/papers/716.pdf
- [5] SOPOUŠEK, J., R. FORET a V. JAN. *Simulation of Dissimilar Weld Joints of Steel P91*. Brno: Masaryk University.
- [6] BLACH, J., P. ŠEVC a A. VÝROSTKOVÁ. ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO VÝSKUMU SAV. VPLYV VODÍKA NA PEVNOSTĚ A PORUŠOVANIE HETEROGENNÉHO ZVAROVÉHO SPOJA Cr-Mo,V OCELÍ PRE ENERGETICKÉ ZARIADENIA PRI ŤAHOVOM NAMÁHANÍ. Košice, 2008.
- [7] ČSN 05 0211. TEPELNÉ A MECHANICKÉ SPRACOVANIE ZVAROVÝCH SPOJOV NELEGOVANÝCH A NÍZKOLEGOVANÝCH OCELÍ: Všeobecné zásady. Český normalizační institut, 1992.
- [8] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška tvrdosti. Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Český normalizační institut, 1998.
- [9] KOUKAL, Jaroslav a T. ZMYDLENÝ. *Svařování I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, s. 25-29. ISBN 9788024808703.
- [10] Měření tvrdosti. NDT. *Www.NDT.cz: nedestruktivní kontrola* [online]. 28.2.2009 [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: http://www.ndt.cz/prilohy/63/mereni_tvrlosti.pdf

- [11] TESTIMA. *Měření tvrdosti přesnými tvrdoměry: Aplikační zpráva*. Praha: Testima, 2008.
- [12] Optická metoda TIV. NDT. *Www.NDT.cz: nedestruktivní kontrola* [online]. 28.2.2009 [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz/prilohy/68/tiv.pdf>
- [13] Dynamická metoda dle standardu ASTM 956. NDT. *Www.NDT.cz: nedestruktivní kontrola* [online]. 28.2.2009 [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: http://www.ndt.cz/prilohy/67/astm_956.pdf
- [14] Ultrazvuková metoda (UCI) dle standardu ASTM 1038-05. NDT. *Www.NDT.cz: nedestruktivní kontrola* [online]. 28.2.2009 [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: http://www.ndt.cz/prilohy/66/uz_metoda_tvrдост.pdf
- [15] COLEMAN, K. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *GuidelineforWeldingCreepStrength-EnhancedFerriticAlloys*. USA, 2007.
- [16] ZACTRUBA, John. P91 – The Workhorse of the Power Industry. *BRIGHT HUB: The Hub for Bright Minds* [online]. May 22, 2011 [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: <http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/64886.aspx>
- [17] HUYSMANS, S. a J. VEKEMAN. *A challenging weld repair of Grade 91 tubing by avoiding PWHT*.
- [18] Faculty of Mechanical Engineering. *IMPACT TOUGHNESS OF STEAMLINE MATERIAL 14MoV6-3 AFTER LONG-TERM EXPLOITATION*. Bosnia and Herzegovina, 2010
- [19] ČSN 41 5128. *OCEL 15128: Cr-Mo-V*. Český normalizační institut, 1984.
- [20] Perspektivní nízkolegované a feritické Cr oceli pro jednotky velkých výkonů. V. Foldyna. All for power: *informační portál a časopis* [online]. 27.4.2009 [cit. 2012-01-11]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/perspektivni-nizkolegovane-a-feriticke-cr-oceli-pro-jednotky-velkych-vykonu/>
- [21] The prediction of maximum HAZ hardness in C-Mn and low alloy steel arc welds. NICHOLAS, Joanna a David ABSON. TWI [online]. Cranfield, 19.6.2008 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.twi.co.uk/services/technical-information/published-papers/the-prediction-of-maximum-haz-hardness-in-c-mn-and-low-alloy-steel-arc-welds-june-2008/?locale=en>
- [22] The prediction of maximum HAZ hardness in various regions of multiple pass welds. NICHOLAS, Joanna M a David J ABSON. TWI [online]. Cranfield, 19.6.2008 [cit. 2012-03-13]. Dostupné z: <http://www.twi.co.uk/services/technical-information/published-papers/the-prediction-of-maximum-haz-hardness-in-various-regions-of-multiple-pass-welds-june-2008/?locale=en>

papers/the-prediction-of-maximum-haz-hardness-in-various-regions-of-multiple-pass-welds-june-2008/?locale=en

- [23] BRZIAK, Peter. VÚZ – PI SR. *Žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny na báze železa*.
- [24] Calculation software of welding: Calculation of HAZ maximum hardness. JWES. *JWES: The Japan Welding Engineering Society*[online]. 2011 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: http://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/calc3.jsp
- [25] OK Tigrod 316LSi. ESAB. *ESAB* [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: http://products.esabna.com/EN/home/filler_metals_catalog/filler_metals_product_detail/q/display_id.id49b18d03cdb331.22881456/category_id.2120
- [26] TIG svařování I - základní principy. *SVARINFO.cz: Svařování prakticky a s nadhledem* [online]. 2009 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>
- [27] Ing. Vladislav Ochodek – Osobní sdělení (VŠB-TU Ostrava, 1. 3. 2012)

Seznam obrázků

Obr. 1 Hydrokrakovací jednotka ATB [1]	12
Obr. 2 Snížení potřebné tloušťky stěny při použití kvalitnějších materiálů [2]	13
Obr. 3 Svarový spoj na silnostěnném parovodu z P91 [2]	15
Obr. 4 Teplotní režim svařování pro ocel P91 [2]	18
Obr. 5 ARA diagram pro P91 [27]	19
Obr. 6 Tvrdost jednotlivých oblastí svarového spoje z P91 [17]	19
Obr. 7 ARA diagram pro 15 128 [27]	20
Obr. 8 Heterogenní spojení 15 128 a P91 (přídavný materiál na bázi CrMoV) [23]	22
Obr. 9 Heterogenní spojení 15 128 a P91 (přídavný materiál na bázi Ni) [23]	23
Obr. 10 Obrázek pořízený CCD kamerou při různých měřeních [11]	26
Obr. 11 Vyhodnocení tvrdosti měřicím přístrojem [11]	26
Obr. 12 Princip dynamické zkoušky tvrdosti. [11]	27
Obr. 13 Úbytek kinetické energie kuličky po odraze od zkoušeného materiálu [11]	28
Obr. 14 Grafické znázornění principu UCI metody [11]	29
Obr. 15 Závislost tvrdosti na $t_{8/5}$ [21]	30
Obr. 16 Závislost tvrdosti na $t_{8/5}$ [22]	31
Obr. 17 Algoritmus dle Yurioky [21]	31
Obr. 18 Algoritmus dle Lorenze a Dürena [21]	31

Obr. 19 <i>Algoritmus dle Suzukiho</i> [21].....	32
Obr. 20 <i>Algoritmus dle Terasakiho</i> [21]	32
Obr. 21 <i>Kombinovaný algoritmus bez vyrovnání martenzitu</i> [21]	34
Obr. 22 <i>Kombinovaný algoritmus s vyrovnáním martenzitu</i> [21]	34
Obr. 23 <i>Postupné hodnocení HJP</i> [22]	36
Obr. 24 <i>Svařování trubek na vzorky metodou TIG</i>	39
Obr. 25 <i>Úprava a očištění svar. ploch + nastehování</i>	40
Obr. 26 <i>Svaření trubky 1. průchodem</i>	40
Obr. 27 <i>Hotový svarový spoj na jedné z trubek</i>	41
Obr. 28 <i>Schematické rozdělení trubky na jednotlivé vzorky</i>	41
Obr. 29 <i>Dělení vzorků na kotoučové pile</i>	41
Obr. 30 <i>Nadělené vzorky</i>	42
Obr. 31 <i>Upnutý vzorek při měření tvrdosti</i>	42
Obr. 32 <i>Umístění vpichu u hranice ztavení</i>	43

Seznam tabulek

Tab. 1 <i>Chemické složení oceli P91</i> [15]	18
Tab. 2 <i>Chemické složení oceli 15 128</i> [19]	21
Tab. 3 <i>Doporučená vzdálenost L mezi středy vtisků v tepelně ovlivněné oblasti</i> [8].....	24
Tab. 4 <i>Vhodnost použití jednotlivých metod NDT</i> [11]	25
Tab. 5 <i>Rozměry vzorků pro experiment</i>	38
Tab. 6 <i>Chemické složení příd. mat. OK TIGROD 316LSi</i> [25].....	39
Tab. 7 <i>Materiály a svařovací parametry</i>	43
Tab. 8 <i>Teplota předehřevu a tepelné zpracování</i>	44
Tab. 9 <i>Výsledky tvrdosti</i>	44

Seznam příloh

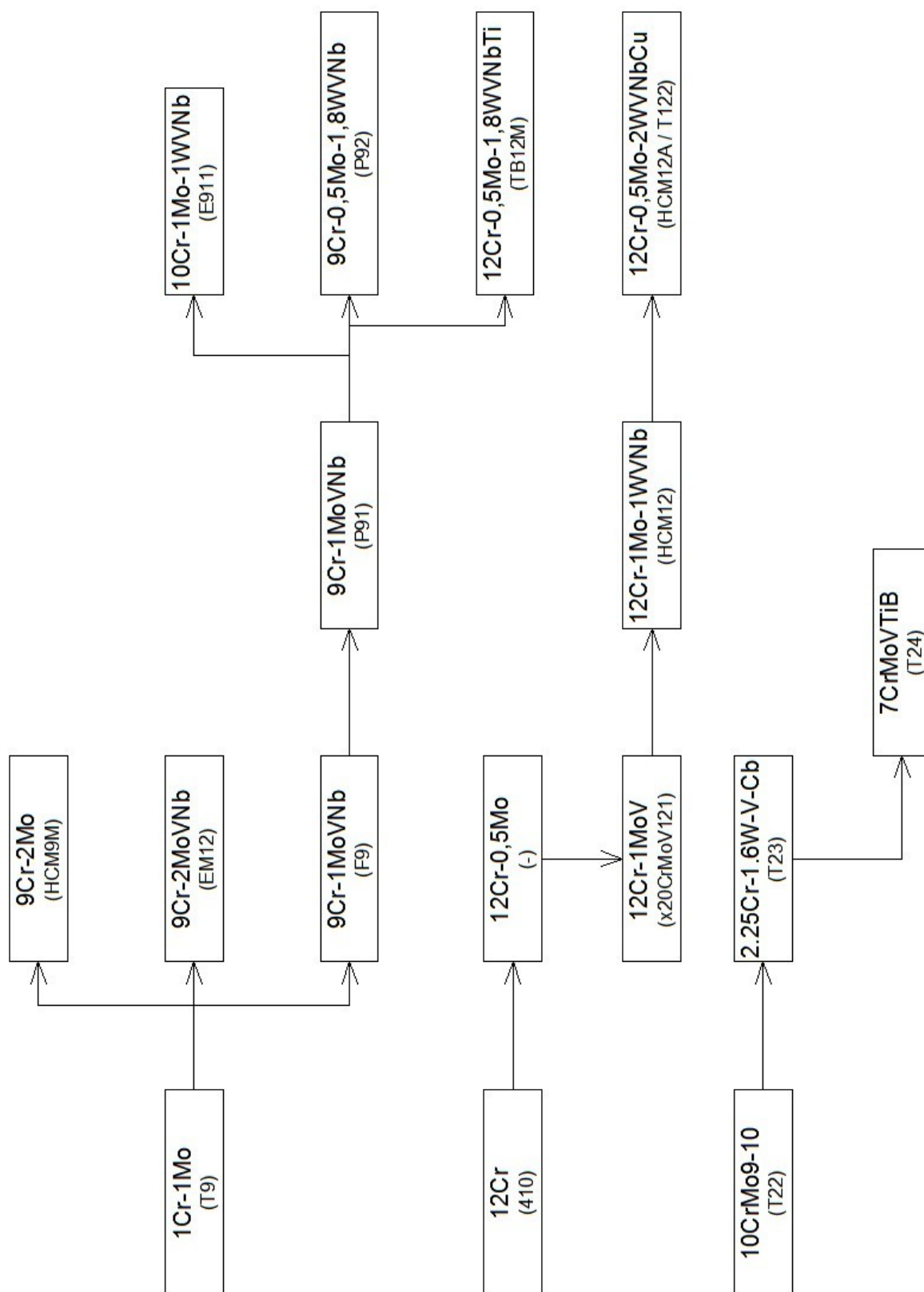
Označení	Název	Počet listů
Příloha 1	Chemické složení, TP a TZ vybraných Cr-Mo ocelí [15, 2]	1
Příloha 2	Značení ocelí P91 a 15 128 podle vybraných norem	1
Příloha 3	Vývoj Cr-Mo ocelí [23]	1
Příloha 4	Umístění vtisků na tupých svarech železných kovů [8]	1
Příloha 5	Umístění vtisků na koutových svarech železných kovů [8]	1
Příloha 6	Umístění vtisků na tupých T-spojích železných kovů [8]	1
Příloha 7	Příklady oblastí pro zjišťování tvrdosti jednotlivými vtisky [8]	1
Příloha 8	Převodní tabulka tvrdostí	4

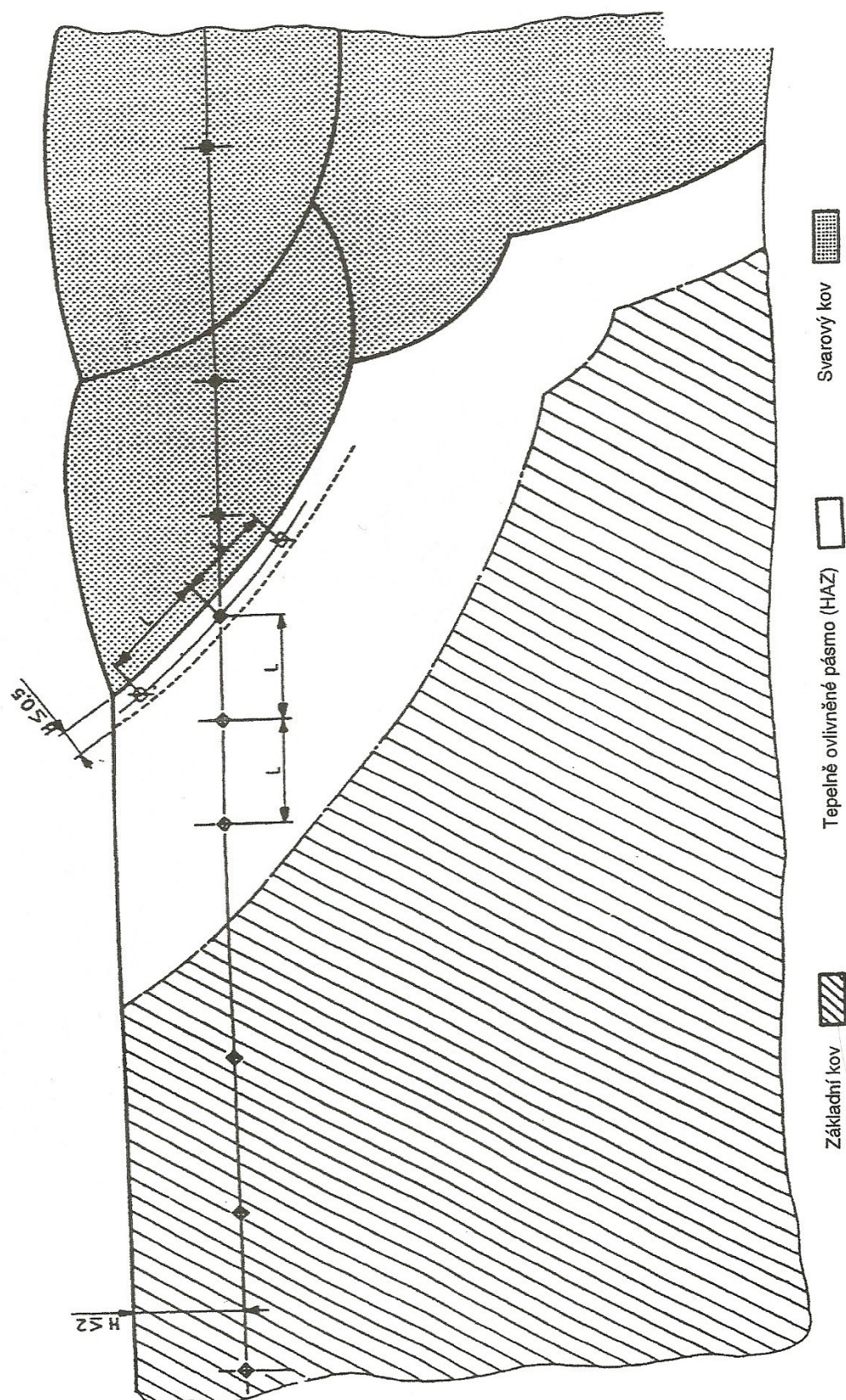
		Materiál						
		15 128	P91	P92	E911	T23	T24	P122
Chemické složení [%]	C	0,10-0,18	0,08-0,12	0,07-0,13	0,10-0,13	0,04-0,1	0,05-0,1	0,07-0,014
	Mn	0,45-0,7	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,1-0,6	0,3-0,7	0,3-0,7
	Si	0,15-0,4	0,2-0,5	<0,5	0,1-0,3	<0,5	0,15-0,45	<0,5
	S	<0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,1
	P	<0,04	<0,02	<0,02	<0,02	<0,03	<0,02	<0,02
	Cr	0,5-0,75	8,0-9,5	8,5-9,5	8,5-9,5	1,9-2,6	2,2-2,6	<10,0-12,5
	Ni	-	<0,4	<0,4	(<0,4)	-	-	<0,5
	Cu	-	-	-	-	-	-	0,3-1,7
	Mo	0,4-0,6	0,85-1,05	0,3-0,6	0,9-1,1	0,05-0,3	0,90-1,1	0,25-0,6
	W	-	-	1,5-2,0	0,9-1,1	1,45-1,75	-	1,5-2,5
	V	0,22-0,35	0,18-0,25	0,15-0,25	0,15-0,25	0,2-0,3	0,2-0,3	1,15-0,3
	Nb	-	0,06-0,1	0,04-0,09	0,06-0,1	0,02-0,08	-	0,04-0,1
	N	-	0,03-0,07	0,03-0,07	0,05-0,08	<0,03	<0,012	0,04-0,1
	B	-	-	10-60ppm	-	5-60ppm	15-70ppm	<0,005
	Al	-	<0,04	<0,040	-	<0,03	<0,02	<0,04
	Ti	-	-	-	-	-	0,05-0,1	-
TP	Teplota [°C]	-	200	200	200	170	200	200
TZ	Teplota [°C]	650-720	730-775	730-800	730-800	720-800	730-760	730-800
	Čas [h]	>1	>2	>2	>2	2	2	2

Příloha 1 Chemické složení, TP a TZ vybraných Cr-Mo ocelí [15, 2, 7]

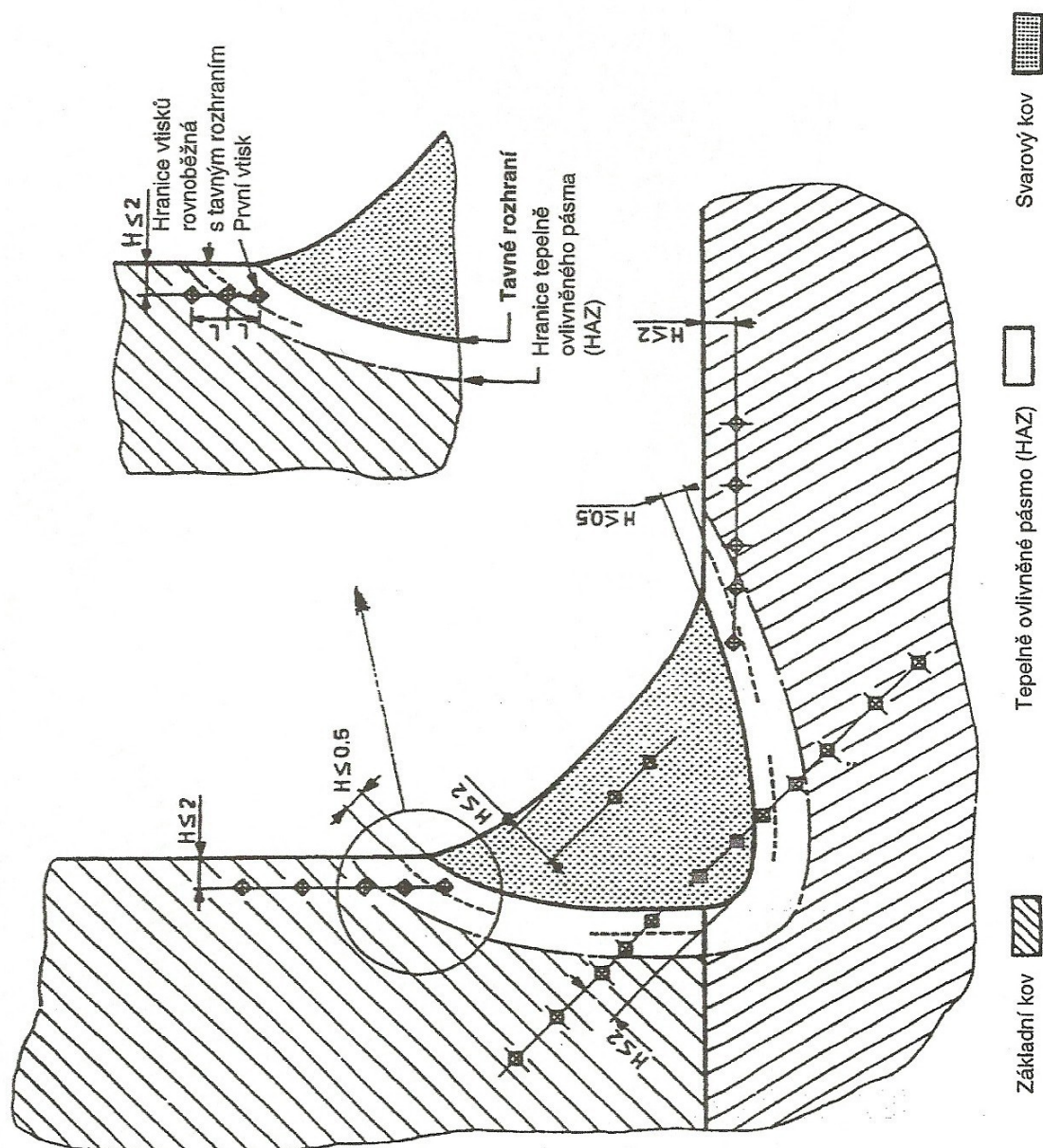
	ČSN	DIN	EN	ISO	ASTM
15 128	15128	14MoV6-3	13MoCrV6	TS/P/F33	Gr.P24
P91	-	X10CrMoVNb9-1		P91	A335 P91

Příloha 2 Značení ocelí P91 a 15 128 podle vybraných norem

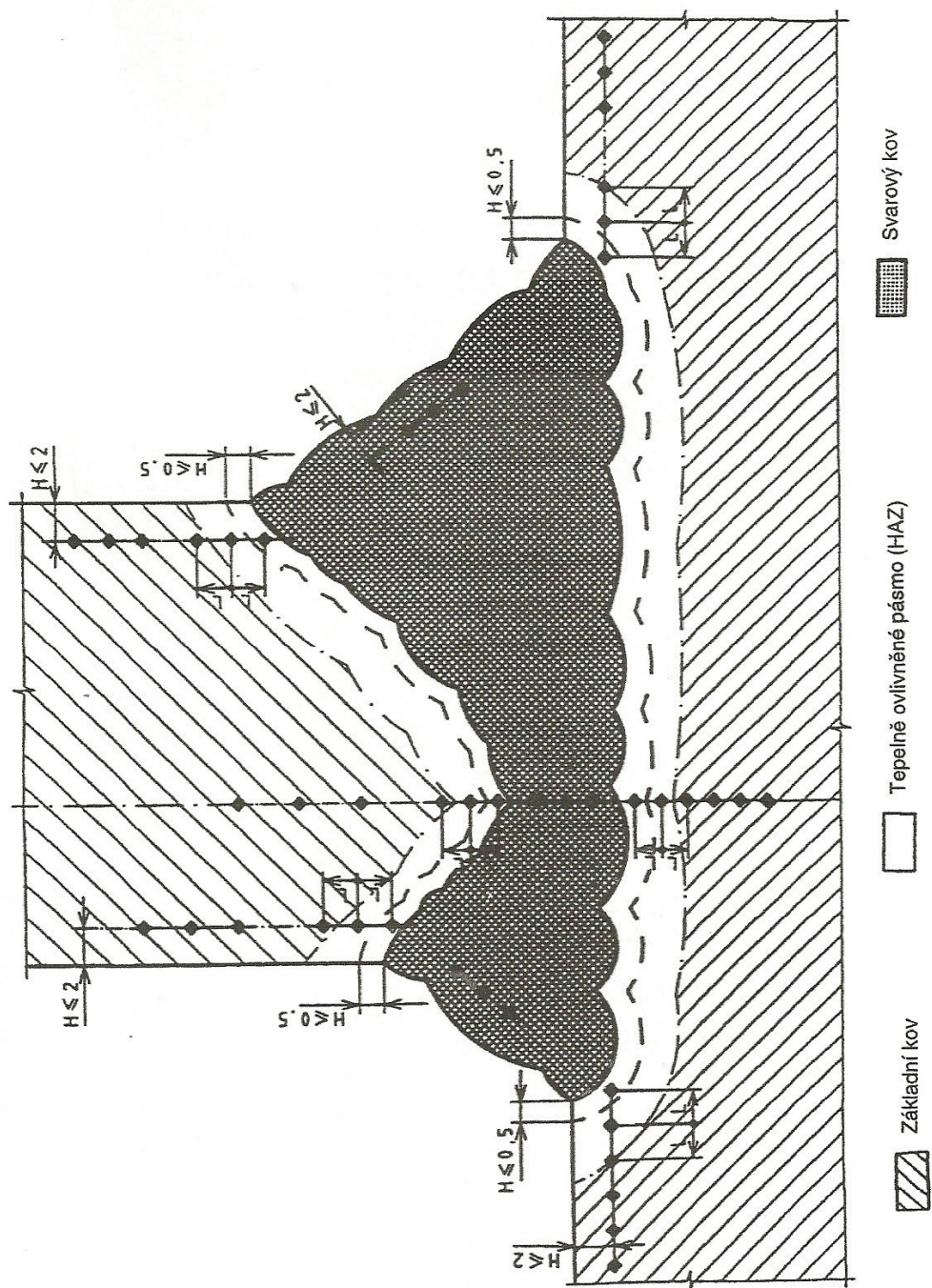




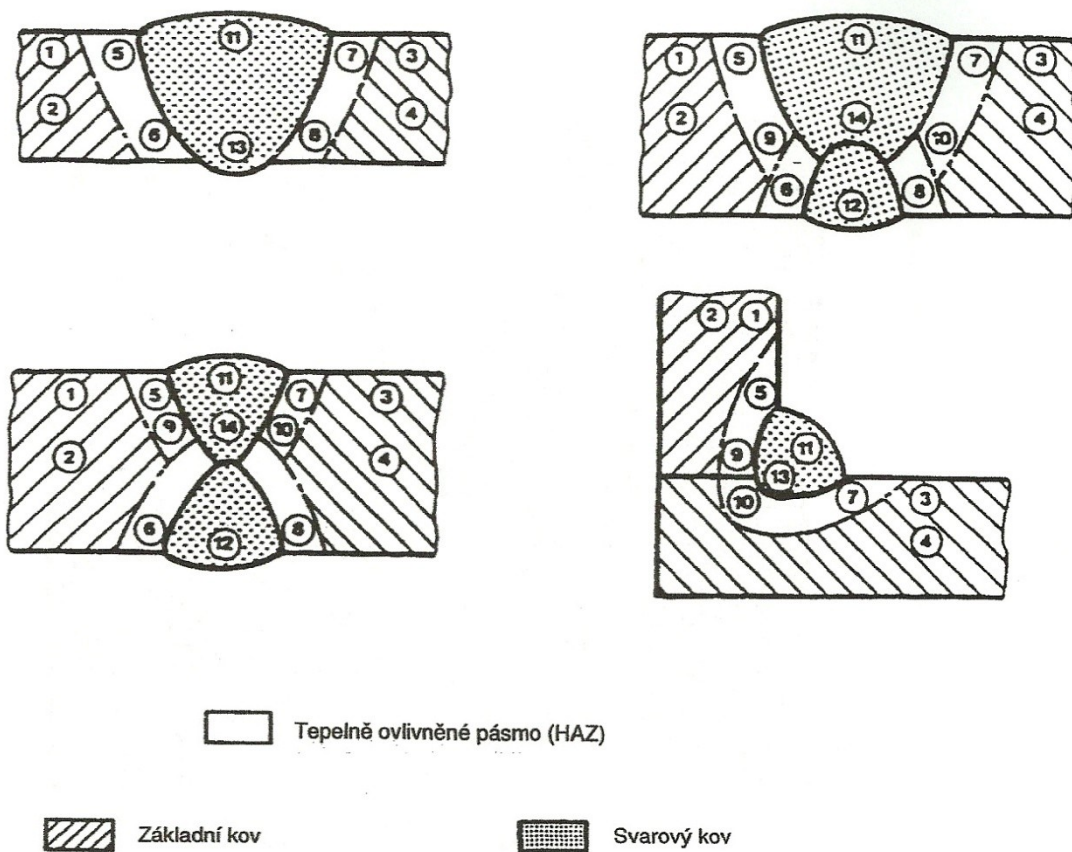
Obrázek 3 - Umístění vtisků na tupých svarech železných kovů
(s výjimkou austenitických ocelí) (rozměry v mm)



Obrázek 4 - Umístění vtisků na koutových svarech železných kovů



Obrázek 5 - Umístění vtisků na tupých T-spojích železných kovů
(s výjimkou austenitických ocelí) (rozměry v mm)



POZNÁMKA - Na základě dohody jsou přípustné i jiné oblasti

Obr. 8 - Příklady oblastí pro zjišťování tvrdosti jednotlivými vtisky (E)

Příloha 7 Příklady oblastí pro zjišťování tvrdosti jednotlivými vtisky [8]

Příloha 8 Převodní tabulka tvrdostí

Rockwell			Brinell		Vickers	Shore
HRA	HRB	HRC	30000kg	500kg	136	
86,5		70			1076	101
86		69			1044	99
85,6		68			940	97
85		67			900	95
84,5		66			865	92
83,9		65	739		832	91
83,4		64	722		800	88
82,8		63	705		772	87
82,3		62	688		746	85
81,8		61	670		720	83
81,2		60	654		697	81
80,7		59	634		674	80
80,1		58	615		653	78
79,6		57	595		633	76
79		56	577		613	75
78,5	120	55	560		595	74
78	120	54	543		577	72
77,4	119	53	525		560	71
76,8	119	52	500		544	69
76,3	118	51	487		528	68
75,9	117	50	475		513	67
75,2	117	49	464		498	66
74,7	116	48	451		484	64
74,1	116	47	442		471	63
73,6	115	46	432		458	62
73,1	115	45	421		446	60
72,5	114	44	409		434	58
72	113	43	400		423	57
71,5	113	42	390		412	56
70,9	112	41	381		402	55
70,4	112	40	371		392	54
69,9	111	39	362		382	52
69,4	110	38	353		372	51
68,9	110	37	344		363	50
68,4	109	36	336		354	49
67,9	109	35	327		345	48
67,4	108	34	319		336	47
66,8	108	33	311		327	46
66,3	107	32	301		318	44
65,8	106	31	294		310	43

Rockwell			Brinell		Vickers	Shore
HRA	HRB	HRC	30000kg	500kg	136	
65,3	105	30	286		302	42
64,7	104	29	279		294	41
64,3	104	28	271		286	41
63,8	103	27	264		279	40
63,3	103	26	258		272	39
62,8	102	25	253		266	38
62,4	121	24	247		260	37
62	100	23	240	201	254	36
61,5	99	22	234	195	248	35
61	98	21	228	189	243	35
60,5	97	20	222	184	238	34
59	96	18	216	179	230	33
58	95	16	210	175	222	32
57,5	94	15	205	171	213	31
57	93	13	200	167	208	30
56,5	92	12	195	163	204	29
56	91	10	190	160	196	28
55,5	90	9	185	157	192	27
55	89	8	180	154	188	26
54	88	7	176	151	184	26
53,5	87	6	172	148	180	26
53	86	5	169	145	176	25
52,5	85	4	165	142	173	25
52	84	3	162	140	170	25
51	83	2	159	137	166	24
50,5	82	1	156	135	163	24
50	81	0	153	133	160	24
49,5	80		150	130		
49	79		147	128		
48,5	78		144	126		
48	77		141	124		
47	76		139	122		
46,5	75		137	120		
46	74		135	118		
45,5	73		132	116		
45	72		130	114		
44,5	71		127	112		
44	70		125	110		
43,5	69		123	109		
43	68		121	107		

Rockwell			Brinell	
HRA	HRB	HRC	30000kg	500kg
42,5	67		119	106
42	66		117	104
41,8	65		116	102
41,5	64		114	101
41	63		112	99
40,5	62		110	98
40	61		108	96
39,5	60		107	95
39	59		106	94
38,5	58		104	92
38	57		102	91
37,8	56		101	90
37,5	55		99	89
37	54			87
36,5	53			86
36	52			85
35,5	51			84
35	50			83
34,8	49			82
34,5	48			81
34	47			80
33,5	46			79
33	45			79
32,5	44			78
32	43			77
31,5	42			76
31	41			75
30,8	40			74
30,5	39			74
30	38			73
29,5	37			72
29	36			71
28,5	35			71
28	34			70
27,8	33			69
27,5	32			68
27	31			68
26,5	30			67
26	29			66
25,5	28			66

Rockwell			Brinell	
HRA	HRB	HRC	3000kg	500kg
25	27			65
24,5	26			65
24,2	25			64
24	24			64
23,5	23			63
23	22			63
22,5	21			62
22	20			62
21,5	19			61
21,2	18			61
21	17			60
20,5	16			60
20	15			59
	14			59
	13			58
	12			58
	11			57
	10			57
	9			56
	8			56
	7			56
	6			55
	5			55
	4			55
	3			54
	2			54
	1			53
	0			53

Poděkování

Ing. Vladislavu Ochodkovi za odborné vedení práce, cenné rady a poskytnutí literatury.
Dále Ing. Xenii Ševčíkové a Ing. Lucii Krejčí, Ph.D. z katedry mechanické technologie VŠB-TU Ostrava, díky kterým mohl být realizován experiment.